

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Marko Brozovič

Uporaba šolske potresne mize za simulacijo obnašanja konstrukcij med potresi

Diplomska naloga št.: 3076

Mentor:

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 10. 9. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani MARKO BROZOVIČ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
UPORABA ŠOLSKE POTRESNE MIZE ZA SIMULACIJO OBNAŠANJA
KONSTRUKCIJ MED POTRESI.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 04.09.2009

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK	624.042.7(043.2)
Avtor	Marko Brozovič
Mentor	doc. dr. Matjaž Dolšek
Naslov	Uporaba šolske potresne mize za simulacijo obnašanja konstrukcij med potresi
Obseg in oprema	99 str., 10 preglednic, 69 slik, 26 enačb, 1 priloga
Ključne besede	šolska potresna miza, konstrukcije, potresi, simulacija, eksperiment

Izvleček

V tej nalogi obravnavamo obnašanje konstrukcij med potresi s pomočjo šolske potresne mize. Glavni cilj naloge je bil usmerjen v pripravo različnih eksperimentov, ki so namenjeni izobraževanju bodočih inženirjev ter osveščanju širše javnosti o potresnem tveganju. V prvem, uvodnem delu, smo pripravili kratek pregled nekaterih raziskovalnih centrov, kjer z uporabo potresnih miz ali reakcijskih sten raziskujejo potresni odziv stavb. V poglavju z naslovom Konstrukcije in potresi smo opisali globalne karakteristike konstrukcij, ki vplivajo na njihovo dinamično obnašanje. To so nosilnost, duktilnost, togost in dušenje. Predstavili smo princip redukcije potresnih sil in metodo načrtovanja nosilnosti ter osnovna načela za zasnovo potresnoodpornih konstrukcij. Poleg omenjenega smo opisali nekatere poškodbe na stavbah, ki so se zgodile med nedavnim potresom *L'Aquila* v Italiji. V naslednjem poglavju opisujemo sestavne dele in upravljanje šolske potresne mize. Naredimo pregled izbranih eksperimentov izvedenih v okviru Združenja univerz za šolske potresne mize (*UCIST*), v katerega je vključena tudi Univerza v Ljubljani, ki je s tem povezana z več kot sto univerzami med katerimi so tudi najbolj ugledne kot na primer Univerza v Stanfordu in Kalifornijska Univerza, Berkeley. V eksperimentalnem delu naloge smo opisali preizkušane, ki predstavlja tri-etažno stavbo. Lastnostni preizkušance so takšne, da ustrezajo kapaciteti potresne mize, njegov odziv pa je dovolj nazoren za prikaz nekaterih fenomenov obnašanja konstrukcij med gibanjem tal. Sledi opis petindvajsetih eksperimentov s katerimi smo prikazali različne lastne nihajne oblike, pojav mehke etaže, torzijsko gibanje zaradi neenakomerno razporejene togosti ali mas po tlorisu konstrukcije, koncentracijo potresnih sil v pritličju konstrukcije in odziv konstrukcij za različne potrese. Eksperimente smo skrbno dokumentirali na zgoščenki, da so lahko dostopni širši javnosti. Opravljeni eksperimenti kažejo, da je šolska potresna miza dober učni pripomoček, ki ob primerni uporabi, pomaga pri razumevanju dinamičnega obnašanja gradbenih konstrukcij.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	624.042.7(043.2)
Autor	Marko Brozovič
Supervisor	Assist. Prof. Matjaž Dolšek
Title	The use of an instructional shake table for simulation of a seismic response of structures
Notes	99 pages, 10 tables, 69 figures, 26 equations, 1 appendix
Key words	instructional shake table, constructions, earthquakes, simulation, experiment

Abstract

In the thesis the behavior of structures during earthquakes is investigated by using the instructional shake table. The main objective of the work was aimed at preparing the various experiments, which are remarked for education of future engineers and general public awareness of earthquake risk. In the first, introductory part, a brief overview of some research centers, which are using shake tables or reaction walls to explore seismic response of buildings, is prepared. In the Section entitled Structures and earthquakes the global characteristics of structures (i.e. strength, ductility, stiffness and damping) that affect the dynamic behavior of structures are briefly summarized. The principle of design force reduction and capacity design method are also explained. In addition to the above, selected damage to buildings, which have occurred during the recent *L'Aquila* earthquake in Italy, is elaborated. The next section examines the components and the use of the instructional shake table and a review of selected experiments carried out within the framework of University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST). The University of Ljubljana is the partner of the UCIST and was in this way joined to a group of more than a hundred universities including to the most reputable such as University of Stanford and the University of California, Berkeley. In the experimental work a specimen, which symbolically represents the three-storey building, was prepared. The specimen was designed to meet the seismic capacity of the table and to clearly present certain phenomena behavior of structures during the ground movement. Twenty-five experiments in which we demonstrate various forms of mode shapes, the soft storey effect, torsional behavior due to the stiffness or mass irregularities, the concentration of seismic forces in the ground floor and the response of structures for different earthquakes, were performed. Experiments have been carefully documented on a CD so that they are easily accessible to the general public. Conducted experiments show that the instructional shake table is good educational tool, which when properly applied, helps in understanding the dynamic behavior of structures.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi naloge se iskreno zahvaljujem doc. dr. Matjažu Dolšku, ki mi je bil vedno pripravljen pomagati. Zahvaljujem se tudi vsem ostalim, ki so pomagali pri nastajanju te naloge.

Posebno se zahvaljujem svoji družini, očetu Stanetu in mami Viki, ki sta mi omogočila študij brez drugih obveznosti in bratu Andreju, ki me je vedno vzpodbujal.

KAZALO VSEBINE

IZJAVA O AVTORSTVU	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	III
ZAHVALA	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
2 KONSTRUKCIJE IN POTRESI	7
2.1 Globalni parametri konstrukcij	7
2.1.1 Nosilnost	7
2.1.2 Duktilnost	8
2.1.2.1 Redukcija potresnih sil	11
2.1.2.2 Metoda načrtovanja nosilnosti	13
2.1.3 Togost	15
2.1.4 Dušenje	16
2.2 Obnašanje konstrukcij med potresi	17
2.3 Osnovni principi za zasnovanje konstrukcij	21
3 OPIS IN UPORABA POTRESNE MIZE <i>QUANSER STII</i>	24
3.1 Namen potresne mize	24
3.2 Opis potresne mize	26
3.2.1 Sistem komponent <i>STII</i>	27
3.2.2 Sestavni deli potresne mize <i>STII</i>	28

3.3	Upravljanje potresne mize.....	33
3.3.1	Upravljanje mize s programsko opremo <i>Shake Table II Software</i>	35
3.3.2	Upravljanje mize s programsko opremo <i>Matlab/Simulink</i>	37
3.3.2.1	Sinusno nihanje.....	39
3.3.2.2	Sinusno nihanje s povečevanjem frekvence	39
3.3.2.3	Prednastavljena pot.....	40
3.3.2.4	Izpis rezultatov	43
3.3.2.5	Opis <i>Simulink</i> diagramov.....	44
3.3.2.6	Osnovna skripta <i>setup.m</i>	49
3.4	Uporaba šolskih potresnih miz drugod po svetu	50
3.5	Delo s potresnimi mizami na daljavo	60
4	EKSPERIMENTALNI DEL	62
4.1	Opis preizkušanca.....	62
4.1.1	Dimenzije preizkušanca	64
4.1.2	Masa preizkušanca in dodatne obtežitve.....	65
4.1.3	Podajnostna in togostna matrika preizkušanca	67
4.2	Prikaz lastnih frekvenc in nihajnih oblik.....	70
4.2.1	Enačba gibanja in posplošen problem lastnih vrednosti	70
4.2.2	Izračun nihajnih časov in nihajnih oblik.....	73
4.2.3	Prikaz prvih lastnih frekvenc za različne konstrukcije	74
4.2.4	Prikaz prve in druge nihajne oblike	75
4.3	Prikaz obnašanja nepravilnih konstrukcij.....	76
4.3.1	Spremenljiva togost po višini konstrukcije (mehka etaža)	77
4.3.2	Nesimetrična togost po tlorisu konstrukcije (torzija).....	78
4.3.3	Nesimetrična postavitve mas po tlorisu konstrukcije (torzija).....	80

4.4	Prikaz koncentracije potresnih sil v spodnji etaži.....	81
4.5	Prikaz odziva konstrukcije pri dejanskih potresih	82
4.5.1	Priprava podatkov za eksperiment.....	83
4.5.2	Prikaz obnašanja različnih konstrukcij med potresom <i>Kobe</i>	87
4.5.3	Prikaz obnašanja konstrukcije med različnimi potresi	91
5	ZAKLJUČEK.....	93
6	VIRI.....	96

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pregled sestavnih delov potresne mize <i>STII</i>	28
Preglednica 2: Lastnosti potresne mize <i>STII</i>	30
Preglednica 3: Dimenzije zgornje plošče.....	31
Preglednica 4: Dimenzije spodnje plošče	31
Preglednica 5: Diagrami za analizo rezultatov	43
Preglednica 6: Dimenzije elementov preizkušanca	64
Preglednica 7: Mase elementov preizkušanca	65
Preglednica 8: Masa dodatne obtežitve.....	66
Preglednica 9: Izračunani nihajni časi in pripadajoče nihajne oblike.....	73
Preglednica 10: Osnovni podatki obravnavanih potresov.....	83

KAZALO SLIK

Slika 1: Priprava šest etažne lesene stavbe za eksperiment na potresni mizi <i>E-Defense</i> (Standing Strong: 2009 NEESWood Capstone Test).....	2
Slika 2: Trietažna nesimetrična stavba pripravljena za simulacijo potresne obtežbe z reakcijsko steno v laboratoriju <i>ELSA</i> (Joint Research Centre).....	4
Slika 3: Odnos med posplošeno silo F in posplošeno deformacijo Δ pri duktilnem in krhkem obnašanju.....	9
Slika 4: Definicija ukrivljenosti armiranobetonskega prereza	10
Slika 5: Odnos med obtežbo F in pomikom u za elastičen in elastoplastičen sistem.....	11
Slika 6: Analogija med konstrukcijo in verigo z duktilnim šibkim členom.....	13
Slika 7: Porušni mehanizem stavbe po gredah in po stebrih ene etaže	14
Slika 8: Konzolni steber	15
Slika 9: Projektni spekter pospeškov za pospešek tal 0.25 g, tip tal B in $q=2$ po EC8.....	16
Slika 10: (a) Posledice potresa <i>L'Aquila</i> in (b) shematski prikaz zasnove konstrukcije	18
Slika 11: (a) Posledice potresa <i>L'Aquila</i> na stanovanjski hiši v kraju <i>Pattino</i> in (b) shematski prikaz zasnove tlorisa.....	19
Slika 12: Poškodbe zaradi potresa <i>L'Aquila</i> (a) na objektu v kraju <i>L'Aquila</i> in (b) na objektu v kraju <i>Pattino</i>	20
Slika 13: Različno poškodovane hiše v vasi <i>Onna</i> , Italija, zaradi potresa <i>L'Aquila</i>	23
Slika 14: Potresna miza <i>Shake Table II</i>	26
Slika 15: Pregled najpomembnejših komponent sistema	27
Slika 16: Zgornji pogled na sestavne dele potresne mize <i>STII</i>	29
Slika 17: Prednji pogled na sestavne dele potresne mize <i>STII</i>	29
Slika 18: Prikaz sistema komponent <i>STII</i> s programsko opremo za krmiljenje.....	33
Slika 19: Program <i>Shake Table II Software</i>	35
Slika 20: Pospešek zabeležen med potresom <i>Kobe</i> 1995 in prilagojena zahtevana pot.....	41

Slika 21: Željeni pomiki, hitrost in pospeški potresne mize za primer sestavljenega sinusnega nihanja	42
Slika 22: <i>Simulink</i> diagram kontrolerja za sinusno nihanje	45
Slika 23: Podsystem <i>Shake Table II</i>	46
Slika 24: Podsystem <i>Accelerometers</i>	48
Slika 25: Podsystem <i>ACC 0: Bias and Filter</i>	48
Slika 26: Prikaz maksimalne amplitude sinusnega nihanja in maksimalnih pospeškov pri različnih frekvencah za dodano maso 0 kg.....	50
Slika 27: Dvoetažni model.....	51
Slika 28: (a) Model enoetažne stavbe in (b) ekscentrično postavljena masa.....	52
Slika 29: 3D model na potresni mizi.....	52
Slika 30: Sestavljen model iz zemljine in konstrukcije	53
Slika 31: (a) Pasivni dušilec vibracij in (b) model konstrukcije z in brez dušilca vibracij.....	55
Slika 32: Shematski prikaz konstrukcije z (a) pasivnim umerjenim, (b) aktivnim in (c) aktivnim umerjenim dušilcem	56
Slika 33: (a) Model togo pritrjen na potresno mizo in (b) model s potresno izolacijo	56
Slika 34: (a) Drseči ležaji in (b) ležaji iz gume.....	57
Slika 35: (a) Model mostu obtežen z dodatno maso in (b) model mostu po poružitvi	58
Slika 36: (a) Model zidane stavbe iz kock LEGO in (b) model jeklene konstrukcije iz igrač <i>K'NEX</i>	59
Slika 37: Prerezan model hiše s pohištvo postavljen na šolsko potresno mizo	59
Slika 38: Program za delo na daljavo <i>RDV</i>	61
Slika 39: (a) Preizkušane na šolski potresni mizi in (b) pogled od blizu na model konstukcije	63
Slika 40: (a) Značilen spoj in (b) pritrditev preizkušanca na potresno mizo	63
Slika 41: Tlorisni pogled na ploščo preizkušanca in 3D pogled na preizkušane	64
Slika 42: Etažne mase	66

Slika 43: (a) Dodatna obtežitev preizkušanca in (b) shematski prikaz dodatne obtežitve	66
Slika 44: Kontrola vnesene sile s silomerom.....	68
Slika 45: Spoji zagotavljajo delno vpetost stebrov.....	68
Slika 46: Pomik pri sili 10N (a) brez in (b) s prednapetimi diagonalami.....	69
Slika 47: Model konstrukcije z eno prostostno stopnjo.....	70
Slika 48: Prve lastne frekvence in prvi lastni nihajni časi za različne konstrukcije.....	75
Slika 49: (a) Preizkušane, (b) 1. nihajna oblika in (c) 2. nihajna oblika.....	76
Slika 50: (a) in (b) Mehka etaža v pritličju.....	77
Slika 51: Mehka etaža v nadstropju.....	78
Slika 52: Primer tlorisa (a) torzijsko toge in (b) torzijsko podajne konstrukcije	79
Slika 53: Torzija v primeru neujemanja centra togosti in centra mas	79
Slika 54: Masa izmaknjena iz centra togosti za (a) 7 cm, (b) 21 cm in (c) 35 cm	80
Slika 55: (a) in (b) Priprava modela konstrukcije za prikaz koncentracije sil v pritličju	82
Slika 56: Del zapisa pospeškov za potres <i>Kobe, HIK, 000</i>	84
Slika 57: Akcelerogram dejanskih pomikov in prirejene pomiki za potres <i>Kobe, HIK, 000</i>	84
Slika 58: Spekter pospeškov za potres <i>Kobe, HIK, 000</i>	85
Slika 59: (a) Kalibriran akcelerogram in prirejene pomiki ter (b) pripadajoč spekter pospeškov za potres <i>Kobe, HIK, 000</i>	86
Slika 60: (a) Kalibriran akcelerogram in prirejene pomiki ter (b) pripadajoč spekter pospeškov za potres <i>Northridge, Sylmar – hospital, 090</i>	86
Slika 61: (a) Kalibriran akcelerogram in prirejene pomiki ter (b) pripadajoč spekter pospeškov za potres <i>Petrovac, Hotel Oliva, 198y</i>	87
Slika 62: (a) in (b) Pospeškomer pritrjen na vrh modela konstrukcije.....	87
Slika 63: Željeni in izmerjeni pomiki potresne mize.....	88
Slika 64: Preizkušanci z različnimi nihajnimi časi.....	89
Slika 65: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 1 pri simulaciji potresa <i>Kobe</i>	90

Slika 66: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3 pri simulaciji potresa <i>Kobe</i>	90
Slika 67: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 7 pri simulaciji potresa <i>Kobe</i>	91
Slika 68: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3 pri simulaciji potresa <i>Northridge</i>	92
Slika 69: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3 pri simulaciji potresa <i>Petrovac</i>	92

1 UVOD

Potresi sodijo med naravne nesreče, ki lahko povzročijo največja opustošenja naravnega predvsem pa urbanega okolja ter številne človeške žrtve. Zaradi posledic potresov vsako leto povprečno umre okrog 10 000 ljudi, medtem ko so ekonomske izgube več milijard evrov in pogosto predstavljajo velik odstotek bruto domačega proizvoda prizadete države (Elnashai, Sarno, 2008).

Do največjega števila smrtnih žrtev in ekonomskih izgub pride zaradi delnih ali popolnih porušitev gradbenih konstrukcij, ki so med močnimi potresi obremenjene povsem drugače kot sicer. Za ublažitev potresnih posledic je potrebno razumevanje dogajanja med potresi. Zato je pomembna smer v gradbeništvu potresno inženirstvo, v okviru katerega se izvajajo številne raziskave obnašanja konstrukcij med potresi. Takšne raziskave se izvajajo analitično in numerično s primerno programsko opremo ter eksperimentalno s kontroliranim vzbujanjem različnih modelov konstrukcij s potresno obtežbo in preučevanjem odziva konstrukcij.

Eksperimentalne raziskave obnašanja gradbenih konstrukcij med potresi se izvajajo z uporabo različne strojne opreme kot so potresne mize in reakcijske stene.

Potresna miza je naprava, ki se uporablja za vzbujanje v eksperimentalne namene pripravljenih preizkušancev oz. modelov konstrukcij s simuliranjem vrste različnih načinov gibanja tal. Vhodni podatek za simulacijo gibanja tal je lahko sinusni signal, akcelerogram dejanskega potresa ali kakršnakoli oblika zapisa pomikov ali pospeškov. Potresne mize imajo običajno pravokotno zgornjo ploščo na katero pritrdimo preizkušance. V splošnem se potresne mize lahko premikajo v vseh šestih prostostnih stopnjah, vendar je običajno gibanje omejeno le na eno ali obe horizontalni smeri. Z opazovanjem in analizo zbranih podatkov med eksperimenti, lahko preučujemo dinamično obnašanje modelov konstrukcij. Uporaba potresnih miz je splošno razširjena po svetu, saj z njimi lahko zagotovimo takšen način vzbujanja konstrukcij kot se vzpostavi med dejansko potresno obtežbo.

Trenutno največja potresna miza na svetu je zgrajena v mestu *Miki*, v bližini mesta *Kobe* na Japonskem in je poznana pod imenom *E-Defense*. Premična ploščad, ki je lahko obtežena s 1200 t dodatne mase, meri 15 x 20 m in ima šest prostostnih stopenj. Ploščad potresne mize *E-Defense* se lahko premika z največjimi pospeški okrog 1.5 g, hitrostmi do 200 cm/s in premiki do ± 100 cm. Potresna miza *E-Defense* se uporablja za analizo dinamičnega obnašanja konstrukcij v naravni velikosti (Sato, Inoue, 2004).

V Združenih državah Amerike so centri za simulacijo potresov povezani v nacionalno združenje za raziskave odziva konstrukcij med potresi *NEES* (*George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation*). Namen združenja je delitev uporabe strojne opreme in pospešitev procesa raziskav v potresnem inženirstvu in tako izboljšanje potresnoodpornega projektiranja ter obnašanja konstrukcij med potresi. V mrežo je vključenih petnajst ustanov, od katerih imajo tri univerze potresno mizo (*University at Buffalo, SUNY, University of CA, San Diego* in *University of Nevada, Reno*). Na spodnji sliki je prikazana zasnova eksperimenta obnašanja šest etažne, lesene, večstanovanjske stavbe v naravni velikosti med simuliranjem dejanskega potresa *Northridge* 1994. Zaradi dimenzij objekta so *NEES*-ovi strokovnjaki eksperiment izvedli na potresni mizi *E-Defense* (George E. Brown, ... *NEES*).



Slika 1: Priprava šest etažne lesene stavbe za eksperiment na potresni mizi *E-Defense*
(Standing Strong: 2009 NEESWood Capstone Test)

Projekt *SERIES (Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies)* povezuje številne evropske institucije, ki delujejo na področju potresnega inženirstva. Partner na projektu je tudi Univerza v Ljubljani, ki jo zastopa prof. Fajfar. V okviru projekta je možno mednarodno sodelovanje in izvajanje eksperimentov v eksperimentalnih centrih po Evropi (SERIES, 2009):

- *TAMARIS, CEA Saclay Research centre, Pariz, Francija,*
- *ELSA (European Laboratory for Structural Assessment), Ispra, Italija,*
- *EUCENTRE TREES Lab (Laboratory for Training and Research in Earthquake Engineering and Seismology), Pavia, Italija,*
- *EQUALS (Earthquake and Large Structures Laboratory), Bristol, Velika Britanija,*
- *LNEC Earthquake Engineering Research Centre, Lizbona, Portugalska,*
- *LCPC Earthquake Simulator in Centrifuge, Nantes, Francija in*
- *The Schofield Centre, Cambridge, Velika Britanija.*

Simulacijo potresne obtežbe je možno zagotoviti tudi s psevdo-dinamičnimi eksperimenti. Pri psevdo-dinamičnem preizkusu se v konstrukcijo, s pomočjo hidravličnih batov in reakcijske stene, vsiljuje pomike, ki se jih izračuna s pomočjo enačbe gibanja. Običajno so vhodni podatki sestavljeni iz potresne obtežbe (akcelerogram), predpostavljene mase in dušenja. Z reševanjem enačbe gibanja program izračuna horizontalne pomike na višini koncentriranih mas za vsak kratek časovni korak. Te pomike se nato preko hidravličnih batov prenese na konstrukcijo. Hkrati se merijo sile, ki so potrebne za vnos pomikov. Te sile se v naslednjem časovnem koraku upoštevajo v računu pomikov (Negro in sod., 2004). Prednost psevdo-dinamičnega preizkusa je ta, da je lahko časovni interval obremenjevanja konstrukcije veliko daljši kot v resnici. Zaradi manjših pospeškov zato ne potrebujemo tako močne hidravlične opreme, preizkus pa lahko spremljamo bolj pozorno in ga morebiti ustavimo še pred poružitvijo. Glavna slabost pa je v tem, da se pri psevdo-dinamičnem testiranju izgubi vpliv dinamičnega obremenjevanja (Rozman, 2005). Na sliki 2 je prikazana zasnova eksperimenta *SPEAR*, ki je bil izveden na reakcijski steni v laboratoriju *ELSA*.



Slika 2: Trietažna nesimetrična stavba pripravljena za simulacijo potresne obtežbe z reakcijsko steno v laboratoriju *ELSA* (Joint Research Centre)

S pomočjo opisanih eksperimentalnih naprav se lahko razmeroma natančno raziskuje obnašanje konstrukcij med potresi, različne vrste dinamičnih pojavov, posledice, ki nastopijo na konstrukcijah, in podobno. Takšne raziskave so zelo pomembne za razumevanje obnašanja konstrukcij med močnimi potresi, ki je potrebno za kvalitetno zasnovo, projektiranje in izvedbo potresnoodpornih objektov. Glede na to, da so velike potresne mize draga strojna oprema, se z izvajanjem in opazovanjem eksperimentov na njih sreča le malo gradbenih projektantov in študentov gradbeništva. Zato se za prikaz osnovnih pojavov v dinamiki gradbenih konstrukcij in potresnem inženirstvu uporabljajo tudi majhne, šolske potresne mize.

Združenje univerz za šolske potresne mize (*University Consortium on Instructional Shake Tables – UCIST*) spodbuja eksperimentalni pristop pri poučevanju potresnega inženirstva in omogoča nakup in podporo pri uporabi majhnih potresnih miz. V združenje *UCIST* je trenutno vključenih preko 100 univerz, ki uporabljajo takšne potresne mize, med katerimi so tudi nekatere najbolj ugledne kot na primer *Stanford University* in *University of California, Berkeley*. Članica združenja *UCIST* je tudi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, ki se je na pobudo prof. Fajfarja odločila za nakup šolske potresne mize. Ta bo uporabljena v izobraževalnem procesu bodočih inženirjev gradbeništva.

V okviru naloge smo se osredotočili na uporabo šolske potresne mize. Glavni cilji pričujočega dela so bili naslednji:

- vzpostavitev delovanja šolske potresne mize,
- izdelava preizkušanca,
- predstavitev glavnih fenomenov obnašanja konstrukcij med dinamično obtežbo in
- izvedba eksperimentov za prikaz obnašanja konstrukcij med potresi v odvisnosti od različnih parametrov.

Majhna potresna miza, s katero smo v nadaljevanju izvedli eksperimente, ima zgornjo premično ploščo kvadratne oblike z dolžino stranice 46 cm in eno prostostno stopnjo. Obteži se jo lahko z dodatno maso preizkušancev oz. modelov konstrukcij do 7 kg, pri čemer je zagotovljen pospešek tal 2.5 g. Največji premiki zgornje plošče so omejeni na ± 7.6 cm. (Shake Table II, User Manual, 2008).

Za prikaz obnašanja konstrukcij med potresnim delovanjem smo izvedli petindvajset eksperimentov, katerih posnetki so zbrani na priloženi zgoščenki. Na tem mestu navajamo kratek opis opravljenih eksperimentov in pripadajočo oznako posnetka na zgoščenki:

- določitev osnovne nihajne oblike za osem različnih konstrukcij s pomočjo resonance (Prva lastna frekvenca 1–8.wmv),
- prikaz prve in druge nihajne oblike (1. in 2. nihajna oblika.wmv),
- prikaz vzpostavitve mehke etaže v različnih nadstropjih in velikost deformacij v tem primeru (Mehka etaža v pritličju.wmv in Mehka etaža v nadstropju.wmv),
- prikaz torzijskega obnašanja zaradi nesimetrično razporejene togosti po tlorisu konstrukcije (Nesimetrična togost (torzija).wmv),
- prikaz torzijskega obnašanja zaradi izmaknjenega centra mas glede na center togosti za tri različne primere (Izmaknjena masa (torzija) 1–3.wmv),
- prikaz koncentracije potresne obtežbe v pritličju (Koncentracija potresne obtežbe.wmv),
- prikaz obnašanja sedmih različnih konstrukcij med simuliranjem dejanskega potresa *Kobe* 1995 (*Kobe* 1–7.wmv) in

- prikaz obnašanja konstrukcije, pri kateri je prišlo do največjih amplifikacij obtežbe v primeru simuliranja potresa *Kobe* 1995, med simuliranjem dejanskih potresov *Northridge* 1994 in *Petrovac* 1979 (Northridge.wmv in Petrovac.wmv).

2 KONSTRUKCIJE IN POTRESI

Namen tega poglavja je predstaviti globalne parametre konstrukcij, ki se izkažejo za najbolj pomembne pri odzivu konstrukcij med potresi. V nadaljevanju opišemo obnašanje stavb med potresi na referenčnem primeru nedavnega potresa *L'Aquila* v Italiji. Ob koncu poglavja so predstavljeni principi zasnove konstrukcij za zagotavljanje primerne obnašanja med potresi.

2.1 Globalni parametri konstrukcij

Pri statični obtežbi je najvažnejši parameter konstrukcije nosilnost. Togost je pomembna v zvezi z velikostjo deformacij, medtem ko je duktilnost v statiki skoraj neznan pojem, čeprav omogoča prerazporeditev obremenitev in s tem indirektno vpliva na nosilnost. Pri močni potresni obremenitvi vsi trije parametri, nosilnost, duktilnost in togost, skupaj z maso in dušenjem, enakovredno predstavljajo osnovne parametre konstrukcije, od katerih je odvisno njeno obnašanje med močnim potresom. Vsebina poglavja je povzeta po dveh učbenikih (Fajfar, 1995 in Fischinger, 1999).

2.1.1 Nosilnost

Nosilnost je definirana kot največja odpornost prereza, elementa ali celotne konstrukcije na obravnavano obtežbo. Če je projektna obremenitev E_d manjša od projektne nosilnosti R_d , ne pride do porušitve. Veljati mora

$$E_d \leq R_d \text{ ali } \gamma_E \cdot E_k \leq \frac{R_k}{\gamma_R}, \quad (1)$$

kjer sta E_k in R_k karakteristični vrednosti za obremenitev in nosilnost, γ_E in γ_R pa pripadajoča varnostna faktorja.

Običajno je dejanska nosilnost E_{dej} višja od zahtevane projektne E_d , kar imenujemo dodatna nosilnost (angl. *overstrength*) Ω , ki je definirana kot

$$\Omega = \frac{E_{dej}}{E_d}. \quad (2)$$

Najpomembnejši viri dodatne nosilnosti so:

- razlika med dejansko in projektno trdnostjo materiala,
- utrjevanje materiala,
- večja količina armature kot je računsko potrebna (zahtevana minimalna armatura),
- zahteve zaradi mejnega stanja uporabnosti,
- vpliv nekonstrukcijskih elementov,
- izvedba na gradbišču je lahko močnejša od projektirane in
- konservativne predpostavke v matematičnih modelih.

Dodatna nosilnost načeloma pozitivno vpliva na prenašanje obremenitev prereza, vendar lahko povzroči neprimerno razporeditev nosilnosti po elementih, kar lahko povzroči vzpostavitev manj primerne porušnega mehanizma.

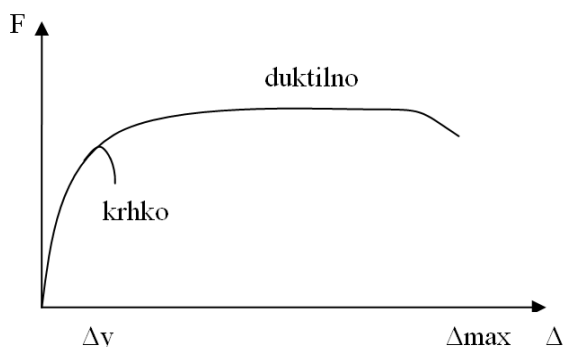
2.1.2 Duktilnost

Duktilnost je sposobnost materiala ali konstrukcije, da prevzame neelastične deformacije brez porušitve kot prikazuje slika 3. Nasprotje duktilnosti je krhkost.

Duktilnost μ je definirana kot razmerje med mejno, neelastično posplošeno deformacijo Δ_{max} in posplošeno deformacijo na meji elastičnosti Δ_y

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}. \quad (3)$$

Točna vrednost duktilnosti je težko določljiva, saj sta tudi vrednosti Δ_{max} in Δ_y težko natančno določeni. Standardi zato namesto zahtevane duktilnosti predpisujejo konstrukcijske ukrepe, ki posredno zadoščajo pogojem duktilnosti.



Slika 3: Odnos med posplošeno silo F in posplošeno deformacijo Δ pri duktilnem in krhkem obnašanju

Če ima konstrukcija zagotovljeno višjo duktilnost od zahtevane, bo ob veliki obtežbi sicer prišlo do poškodb konstrukcije, vendar ne do porušitve.

Duktilnost lahko definiramo za material, prerez in celotno konstrukcijo, pri čemer se spreminja pomen posplošenih oznak F in Δ . Naštete vrste duktilnosti smo na kratko opisali v nadaljevanju.

Duktilnost materiala

Pri definiciji duktilnosti materiala, predstavlja posplošena sila F napetost σ , posplošena deformacija Δ pa deformacijo ε .

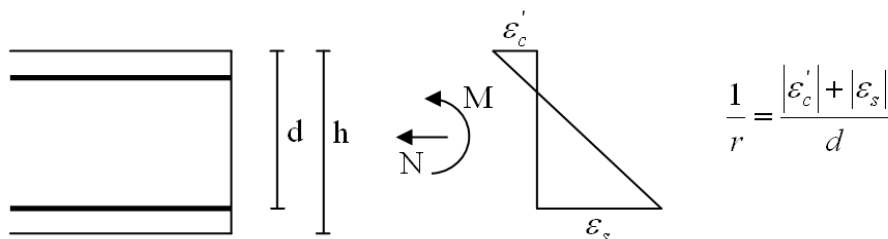
Materiali se med seboj razlikujejo po duktilnosti. Beton je še posebno v nategu izrazito neduktilen, t.j. krhek material. Z višanjem tlačne trdnosti, duktilnost betona pada. Pri hitrem obremenjevanju, značilnem za potresno obtežbo, se povečujeta modul elastičnosti in trdnost betona, zmanjšuje se duktilnost.

Jeklo pred porušitvijo doseže bistveno večje deformacije, kar pomeni, da je duktilen material. Jeklo se obnaša podoben v tlaku in nategu, z višanjem trdnosti pa mu duktilnost pada. Hitro naraščanje obremenitev povečuje trdnost jekla.

V primeru, da je material, iz katerega je narejena konstrukcija, duktilen, to še ni zagotovilo, da se celotna konstrukcija obnaša duktilno (npr. jeklene konstrukcije). Pomembno je pravilno konstruiranje in izvedba detajlov. Duktilnost konstrukcije je možno doseči tudi s primerno kombinacijo duktilnih in krhkih materialov (npr. armiranobetonske konstrukcije).

Duktilnost upogibno obremenjenega prereza

Pri definiciji duktilnosti upogibno obremenjenega prereza, predstavlja posplošena sila F upogibni moment M , posplošena deformacija Δ pa ukrivljenost $1/r$, ki je definirana kot prikazuje spodnja slika.



Slika 4: Definicija ukrivljenosti armiranobetonskega prereza

Armirani beton je kombinacija krhkega in duktilnega materiala, zato se lahko obnaša na oba načina. V primeru strižnih porušitev skoraj vedno nastopi krhki lom pri katerem se disipira malo energije. Upogibno obremenjen prerez se obnaša duktilno, če je pravilno konstruiran. Tudi v tem primeru namreč lahko pride do krhke porušitve po betonu, če je v prerezu preveč natezne armature ali če nanj deluje prevelika osna sila. Obnašanje armiranobetonskega prereza se izboljša z uporabo stremenske armature. Ta nekoliko poveča trdnost in ustvarja triosno napetostno stanje, kar dovoljuje večje deformacije in s tem izboljšuje duktilnost. Boljši učinek od pravokotnih stremen ima spiralna armatura, ki deluje v vsaki točki oboda. Poškodbe upogibno obremenjenih duktilnih prerezov, t.j. plastičnih členkov, se relativno enostavno sanira.

Duktilnost konstrukcije kot celote

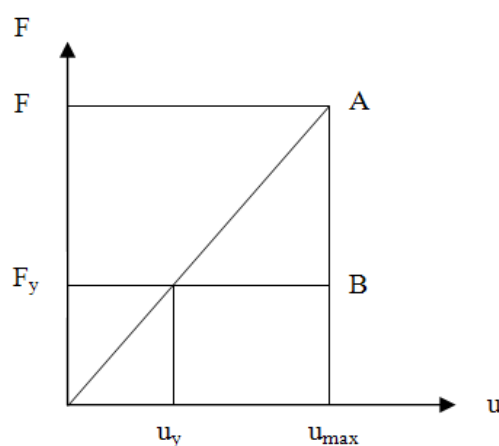
Pri definiciji duktilnosti konstrukcije kot celote, predstavlja posplošena sila F sumarno prečno silo na značilnem mestu (npr. ob vpetju), posplošena deformacija Δ pa horizontalni pomik na značilnem mestu (npr. na vrhu).

Ločimo duktilne konstrukcije, pri katerih nastopijo velike neelastične deformacije pred porušitvijo in krhke konstrukcije, ki se kmalu po dosegu meje elastičnosti porušijo. Plastifikacija je v konstrukcijah lokalno omejena, zato pri določanju duktilnosti konstrukcije potrebujemo veliko večje faktorje duktilnosti za material in ukrivljenost prerezov.

2.1.2.1 Redukcija potresnih sil

Pri projektiranju konstrukcij običajno uporabljamo elastične metode za določitev projektnih sil. Zaradi tega prave duktilnosti konstrukcije ne določamo, ampak jo v procesu projektiranja samo predpostavimo. Posledično so projektne potresne sile manjše od potresnih sil, ki bi se razvile na konstrukciji, če bi se ta obnašala elastično.

Ob upoštevanju predpostavke, da so pomiki, ki so posledica potresne obtežbe, neodvisni od nosilnosti konstrukcije, kar je bilo empirično ugotovljeno za zgradbe srednje in majhne togosti, lahko princip redukcije potresnih sil določimo s pomočjo spodnje slike.



Slika 5: Odnos med obtežbo F in pomikom u za elastičen in elastoplastičen sistem

Iz slike 5 sledi

$$\frac{F}{F_y} = \frac{u_{max}}{u_y}, \quad (4)$$

kjer je po definiciji $u_{max}/u_y = \mu$ zahtevana duktilnost. Konstrukcija A z nosilnostjo F bo potres zdržala v elastičnem območju brez poškodb. Konstrukcija B bo med istim potresom poškodovana, vendar se ne bo porušila, če lahko zdrži pomik u_{max} , če ima torej dovolj veliko zagotovljeno duktilnost. Nosilnost konstrukcije B je lahko za faktor redukcije manjša od nosilnosti konstrukcije A

$$F_y = \frac{F}{\mu}. \quad (5)$$

Pri konstrukcijah z zagotovljeno veliko duktilnostjo so možne velike redukcije potresnih sil, medtem ko pri povsem krhkih konstrukcijah redukcija sploh ni mogoča. Obstaja možnost izbire načina projektiranja pri veliki nosilnosti in majhni duktilnosti, pri majhni nosilnosti in veliki duktilnosti ali kje vmes. Dimenzioniranje na veliko nosilnost, pomeni, da objekt ostane v elastičnem področju in praktično nepoškodovan, vendar takšen način projektiranja v splošnem ni ekonomsko upravičen, zato se uporablja le za objekte izredne pomembnosti. Pri običajnih objektih se z manjšim ekonomskim vložkom in z izbiro ustreznega materiala, ustreznih detajlov ter primerne zasnove konstrukcije zagotovi večjo duktilnost. Kljub temu, da je pri višji duktilnosti konstrukcije lahko njena nosilnost manjša, je potrebno zadostiti neki spodnji meji nosilnosti, da se prepreči poškodbe pri manjših potresih in možnost porušitve pri močnejših potresih zaradi lastne teže pri velikih deformacijah. Pri večini objektov torej dopustimo možnost nastanka poškodb med močnejšimi potresi, vendar preprečimo porušitev celotne konstrukcije.

Za toge konstrukcije je možna manjša redukcija nosilnosti. Redukcija je odvisna od duktilnosti konstrukcije, od lastnega nihajnega časa konstrukcije in od sprejemljivosti poškodb.

2.1.2.2 Metoda načrtovanja nosilnosti

Načrtovanje nosilnosti (angl. *capacity design*) je metoda projektiranja, pri kateri izbrane elemente konstrukcijskega sistema projektiramo in konstruiramo tako, da lahko sipajo energijo med velikimi deformacijami. Vsem ostalim elementom zagotovimo tako veliko nosilnost, da je izbran način sipanja energije mogoč.

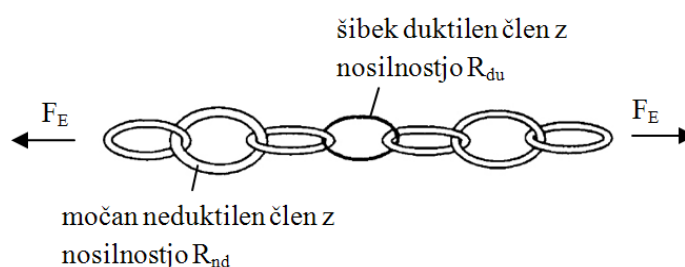
S postopkom načrtovanja nosilnosti nekatere duktilne konstrukcijske elemente projektiramo tako, da delujejo kot varovalke za ostale kritične dele konstrukcije. Pricip metode lahko enostavno razložimo, če si konstrukcijo zamislimo kot verigo na sliki 6. Sila v verigi F_E je omejena z dejansko nosilnostjo najšibkejšega, vendar duktilnega člena R_{du}

$$F_E \leq R_{du} \quad (6)$$

Če je nosilnost ostalih neduktilnih elementov R_{nd} toliko višja

$$R_{nd} > R_{du}, \quad (7)$$

da napetosti ostanejo v elastičnem področju, bodo plastične deformacije in s tem poškodbe omejene samo na šibek duktilni člen, ki deluje kot varovalka. Upoštevati je potrebno, da je lahko dejanska nosilnost R_{du} večja od potrebne zaradi dodatne nosilnosti. Če je dodatna nosilnost duktilnega člena prevelika, se lahko poškodbe vzpostavijo na drugih elementih. V tem pogledu deluje dodatna nosilnost nezaželjeno.

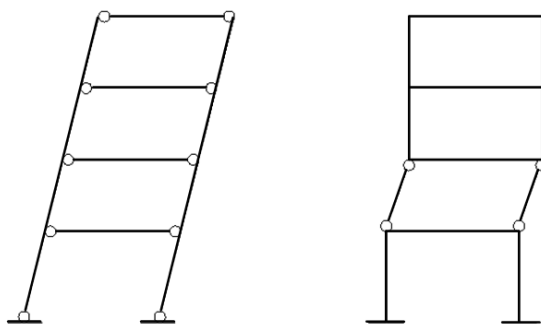


Slika 6: Analogija med konstrukcijo in verigo z duktilnim šibkim členom

Glede na reducirano potresno obtežbo dimenzioniramo nosilnost šibkih duktilnih členov R_{du} . Nosilnost ostalih elementov R_{nd} se določi iz statičnega ravnotežja v primeru, ko je nosilnost

duktilnih členov R_{du} polno izkoriščena. Zagotoviti je potrebno zadostno duktilnost šibkih duktilnih členov.

Na ta način konstrukciji takorekoč povemo, kako naj se obnaša. Za primer okvirov sta na sliki 7 predstavljena dva porušna mehanizma. Primernejši je porušni mehanizem po gredah, zaradi enakomernejše razporeditve plastifikacije na večje število prerezov, enostavnejše zagotovitve duktilnosti v gredah, kjer ne nastopa velika osna sila, in ker je morebitna porušitev grede manj kritična od porušitve stebra. Željeni način obnašanja lahko dosežemo s projektiranjem ugodnih razmerij nosilnosti med duktilnimi in neduktilnimi elementi.



Slika 7: Porušni mehanizem stavbe po gredah in po stebrih ene etaže

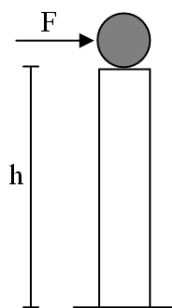
Uporabo metode načrtovanja nosilnosti lahko prikažemo na enostavnem primeru armiranobetonskega konzolnega stebra (slika 8), kjer želimo preprečiti krhko, strižno porušitev. Račun poteka v naslednjih korakih:

1. Vzdolžno armaturo določimo na osnovi računskega upogibnega momenta M_d in pripadajoče osne sile N_d po elastični analizi.
2. Določimo projektno upogibno nosilnost M_{Rd} .
3. Ocenimo dejansko upogibno nosilnost $M_{Rd,dej}$, ki je večja od M_{Rd} zaradi dodatne nosilnosti

$$M_{Rd,dej} = \gamma_{Rd} M_{Rd} \quad (8)$$

4. Določimo varovano količino, maksimalno možno prečno silo

$$V = \frac{M_{Rd,dej}}{h} \leq q \cdot V_{el} \quad (9)$$



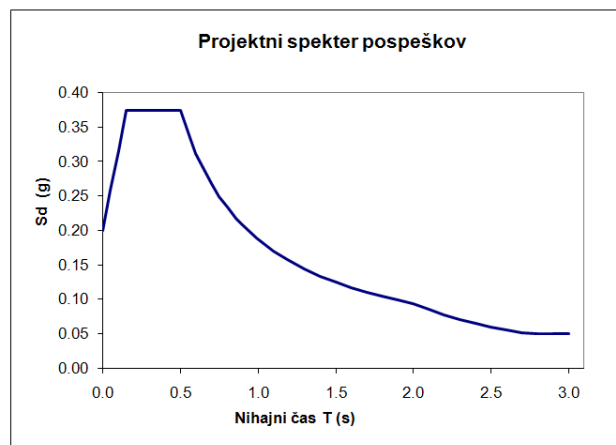
Slika 8: Konzolni steber

2.1.3 Togost

Naslednji pomemben parameter za obnašanje konstrukcij med potresi je togost. Togost ter razporeditev in velikost mas, določata nihajne čase in nihajne oblike konstrukcij. Če se osnovni nihajni čas konstrukcije ujema s predominantnimi ali prevladujočimi periodami potresa, pride do največjih amplifikacij obremenitev.

Togost konstrukcij se med močnimi potresi spreminja. Zaradi nastajanja in povečevanja poškodb, togost pada, s tem pa se daljšajo nihajni časi konstrukcij. S stališča velikosti potresnih sil učinkuje to ponavadi ugodno, saj so običajno prevladujoče periode potresov razmeroma nizke in pride s tem konstrukcija v območje manjših amplifikacij obremenitev.

Za ilustracijo napisanega pogledimo projektni spekter pospeškov, ki predstavlja poenostavljen in pričakovan spekter pospeškov bodočih potresov. Priporočen projektni spekter pospeškov po EC8 (prEN 1998-1) za pospešek tal 0.25g, tip tal B in redukcijski faktor $q = 2$ je prikazan na sliki 9. Za primer spodnjega spektra lahko rečemo, da pride na konstrukciji do največjih amplifikacij obtežbe, če ima ta osnovni nihajni čas med 0.15 in 0.5 s. V primeru nastajanja poškodb, padanja togosti in večanja nihajnega časa, se ta pomakne na grafu proti desni, kar predstavlja zmanjšanje obremenitev. Več o spektrih pospeškov je napisanega v poglavju 3.6.1.



Slika 9: Projektni spekter pospeškov za pospešek tal 0.25 g, tip tal B in $q=2$ po EC8

Deformacije konstrukcij z večjo togostjo so manjše kot pri bolj podajnih konstrukcijah. To posledično pomeni manjše poškodbe nekonstruktivnih elementov pri bolj togih konstrukcijah. Glede na to, da je ekonomska vrednost konstrukcije običajno manjša od nekonstruktivnih elementov in opreme objektov, je potrebno konstrukcijo zasnovati tako, da ne pride do prevelikih poškodb ostalih elementov. V tem pogledu so na potresnih območjih primernejše bolj toge konstrukcije.

2.1.4 Dušenje

Nihanje konstrukcij, na katere ne deluje zunanja obtežba se sčasoma ustavi. Do tega pride zaradi sil dušenja, ki se upirajo gibanju konstrukcij. Energija, ki je med potresom dovedena v konstrukcijo, povzroča premikanje, deformacije, poškodbe in morda celo porušitev konstrukcije. Zato je zelo pomembno zmanjšanje te odvečne energije, kar imenujemo tudi disipacija energije ali dušenje. Obstaja več vrst dušenja.

Notranje viskozno dušenje se pojavlja zaradi viskoznosti materiala. Proporcionalno je relativni hitrosti in narašča z večanjem frekvence nihanja. Ta tip dušenja prevladuje pri nihanju v elastičnem področju. Viskozno dušenje pri gradbenih konstrukcijah znaša običajno do 5 % kritičnega dušenja.

Eden od načinov disipacije energije je tudi trenje, ki ima lahko pomemben vpliv na primer pri zidanih polnilih v fazi po razpokanju.

Zelo pomemben način dušenja ali sipanja energije v konstrukciji opisujemo s pojmom histerežno dušenje. Potresna obtežba je sestavljena iz kratkotrajnih sunkov, ki spreminjajo smer delovanja. Zato, za razliko od statične obtežbe, formiranje rušnega mehanizma ob nastopu mejne obtežbe še ne pomeni nujno porušitve konstrukcije. Konstrukcija mora biti dovolj duktilna, da za kratek čas prenese plastične deformacije in nastop rušnega mehanizma, dokler se smer obtežbe ne spremeni.

Odnos obtežba - pomik opisuje v primeru cikličnega obremenjevanja histerežno krivuljo. Površina zanke predstavlja količino mehanske energije, ki se med odzivom spreminja v ostale oblike energije in tako zmanjšuje velikost obtežbe. Količina disipirane energije je tako odvisna od velikosti pomikov.

Dušenje vpliva ugodno, saj zmanjšuje amplitude nihanja.

2.2 Obnašanje konstrukcij med potresi

Potresi, ki predstavljajo časovno spremenljivo obtežbo, povzročijo dinamično obnašanje konstrukcij. Nekateri pojavi, ki nastanejo pri tem, lahko povzročijo močne poškodbe na praktično vseh vrstah konstrukcij. V nadaljevanju predstavljamo nekaj značilnih pojavov med potresnim delovanjem, s poudarkom na pojavu mehke etaže, torzije in koncentracije sil v spodnji etaži, ki jih v eksperimentalnem delu prikažemo s potresno mizo.

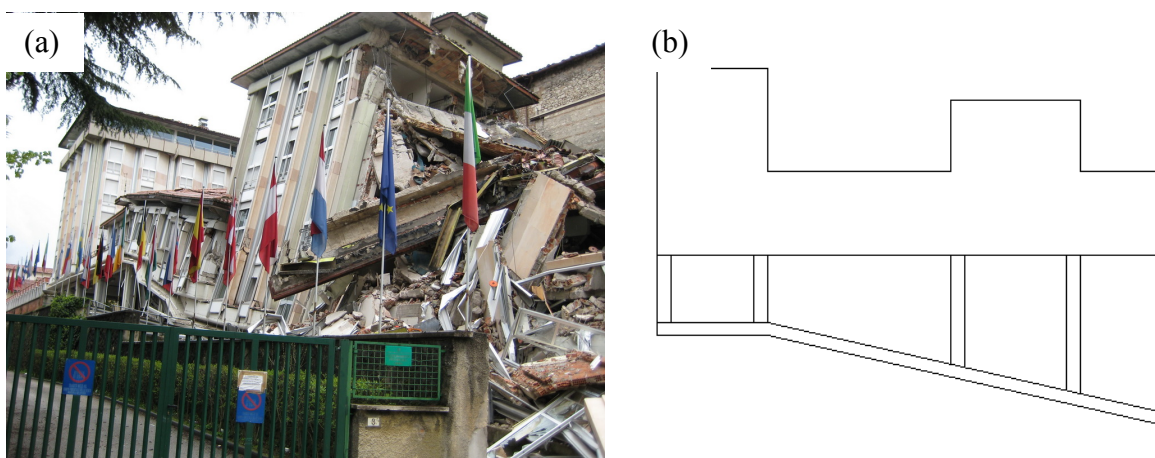
Za referenčni primer potresa smo vzeli nedavni potres *L'Aquila*, ki se je zgodil 6. aprila 2009 v Italiji. Magnituda potresa, z globino okrog 10–12 km, je bila ocenjena na 5.8 po *Rihter*-jevi lestvici. Največji horizontalni pospeški tal so presegli vrednost 0.35 g, pripadajoče hitrosti tal so bile okrog 25 cm/s, največje izmerjene horizontalne deformacije tal pa so bile okrog 20 cm. Potres je zahteval več kot 300 smrtnih žrtev in 10 000–15 000 uničenih ali poškodovanih

stanovanjskih objektov. (Manfredi, 2009). Takšen potres se lahko zgodi tudi na območju Slovenije.

Zaradi raznih arhitektonskih zahtev pride pri konstrukcijah večkrat do različnih neregularnostih po višini stavb. Nezveznosti v zasnovi konstrukcije zmanjšuje duktilnost celotne konstrukcije. Na območju nezveznosti se med močnimi potresi lahko pojavi plastifikacija materiala. Če se to odraža na manjšem področju, lahko poškodbe ogrozijo stabilnost celotne konstrukcije. Velikokrat nastanejo takšni pojavi v primeru oslabiljene etaže ali t.i. mehke etaže. Ta se vzpostavi v primeru višje etažne višine ali manjšega števila nosilnih in nenosilnih elementov v primerjavi z ostalimi etažami.

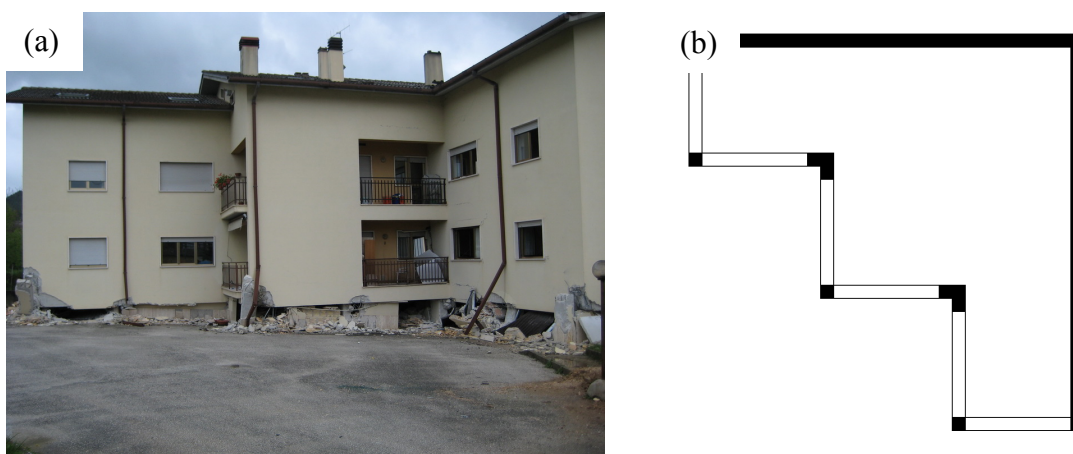
V primeru nesimetrično razporejene togosti ali mas po tlorisu konstrukcije pride do torzijskih obremenitev. V tem primeru se središči togosti in mas ne ujemata v isti točki, zato središče mas niha okoli središča togosti. Običajno to pomeni, da so šibkejši elementi še dodatno obremenjeni zaradi torzijskega gibanja, zaradi česar pride hitreje do poškodb in porušitve.

Zaradi vzpostavitve mehke etaže in torzijskega delovanja med potresom *L'Aquila* je prišlo do porušitve hotela na sliki 10a. Na sliki 10b je shematsko prikazana zasnova porušenega hotela, kjer je spodaj jasno vidna mehka etaža zaradi dovozne poti in razlika v togostih zaradi različnih višin stebrov. Iz teh razlogov je šibkejši, desni del objekta nihal okoli središča togosti, kar je imelo za posledico popolno porušitev tega dela stavbe.



Slika 10: (a) Posledice potresa *L'Aquila* in (b) shematski prikaz zasnove konstrukcije

Do podobnega rušenja je prišlo v primeru stanovanje hiše prikazane na sliki 11a. V tem primeru se je porušila mehka etaža, medtem ko v višjih nadstropjih zunaj ni vidnih večjih poškodb. Do mehke etaže je prišlo zaradi uporabe polnil v višjih nadstropjih. Tloris konstrukcije je zasnovan, kot prikazuje slika 11b, z močno steno po dveh stranicah in garažnimi odprtinami drugod. Neenakomerna razporeditev togosti po tlorisu povzroča torzijo, ki je med potresom porušila šibke elemente.



Slika 11: (a) Posledice potresa *L'Aquila* na stanovanjski hiši v kraju *Pattino* in
(b) shematski prikaz zasnove tlorisa

Pri večetažnih stavbah pride običajno do največjih poškodb v spodnjih nadstropjih saj so na tem mestu etažne prečne sile največje, kar nazorno kažeta sliki 12a in 12b.

Za potresno odpornost je pomembna tudi povezanost konstrukcije kot celote, sicer lahko na primer polnila padejo iz svoje ravnine, kot prikazano na sliki 12a. V tem primeru lahko pride tudi do vzpostavitve mehke etaže, saj so višje etaže v primerjavi s spodnjo utrjene s polnili.

Pri stenah, kjer višina ni bistveno večja od širine, so kritične strižne obremenitve. Te povzročajo diagonalne razpoke pravokotno na smer največjih nateznih napetosti. Zaradi spreminjanja smeri horizontalnih sil med potresom, se spreminjata tudi smeri diagonal največjih nateznih in tlačnih napetosti. Zato se razpoke pojavijo vzdolž obeh diagonal in imajo značilno X obliko, kot prikazuje slika 12b.



Slika 12: Poškodbe zaradi potresa *L'Aquila* (a) na objektu v kraju *L'Aquila* in
(b) na objektu v kraju *Pattino*

Opisali smo le nekatere načine in vzroke za poškodovanost ali porušitev konstrukcij. Nekateri druge problematične pojave med močnimi potresi na tem mestu le naštejemo:

- strižna porušitev kratkih stebrov,
- porušitev stika delov konstrukcije z različno togostjo ali različnih konstrukcij,
- nestabilnost nekonstrukcijskih elementov,
- nezaželen vpliv nekonstrukcijskih elementov na obnašanje konstrukcije,
- porušitev stikov pri montažnih konstrukcijah,
- nestabilnost konstrukcije zaradi utekočinjenja tal (likvefakcija),
- uničenje nekonstruktivnih delov zaradi velike podajnosti konstrukcije,
- porušitev konstrukcije po enem prerezu v primeru statične določenosti,
- porušitev zaradi nepovezanosti nosilnih elementov v celoto in podobno.

2.3 Osnovni principi za zasnovo konstrukcij

Pomembnost zasnove konstrukcij za kontroliran potresni odziv konstrukcije pri močnih potresih je vključena v navodila za projektiranje po vsem svetu. Za doseg ustreznega obnašanja konstrukcij med potresi so v spodnjih točkah zbrani osnovni principi za zasnovo konstrukcij (Elnashai, Sarno, 2008).

- **Enostavnost**
Jasne in direktne poti za vertikalne in horizontalne sile za kombinacijo lastne, koristne in potresne obtežbe. V tem primeru so napovedi seizmičnega obnašanja natančnejše. Poleg tega je dimenzioniranje in konstruiranje enostavnih konstrukcij ekonomsko bolj učinkovito kot pri kompleksnih konstrukcijskih sistemih.
- **Uniformiranost (enakomernost) in simetričnost**
Enakomerna porazdeljenost in simetričnost konstrukcijskih elementov po tlorisu v obeh smereh in po višini omogoča gladek in direkten prenos inercialnih sil. Nosilni elementi naj bodo po višini neprekinjeni, brez naglih sprememb togosti ali mas po etažah. Spremembe tlorisa po višini naj bodo omejene. Koncentracije napetosti ali zahteve po veliki duktilnosti povzročajo hitrejšo porušitev. Včasih je nujna razdelitev celotne konstrukcije na neodvisne dele z uporabo seizmičnih členov (angl. *seismic joint*). Enakomerna razporeditev mas, nosilnosti in togosti onemogoči velike ekscentričnosti med centroma mas in togosti. Ekscentričnost povzroča torzijo, ki povzroča neželjene efekte v potresnem odzivu konstrukcij.
- **Statična nedoločenost (sposobnost prerazporejanja obremenitev)**
Z večanjem števila kritičnih ali plastičnih področij v konstrukcijskem sistemu, ki histerezno disipirajo energijo, je obnašanje konstrukcije zanesljivejše. Za primer okvirov se zagotovi dobro obnašanje z velikim številom plastičnih členkov, ki se formirajo na koncih nosilcev. Pomembna je tudi izvedba stikov.

- Nosilnost in togost v dveh smereh
Elementi nosilni v eni smeri, ki so pravokotno razporejeni po tlorisu, zagotavljajo podobno nosilnost in togost v glavnih smereh konstrukcije. Visoka horizontalna togost omejuje velike pomike, ki bi lahko povzročali nestabilnost ali poškodbe konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementov.
- Torzijska nosilnost in togost
Ustrezna torzijska nosilnost in togost je nujna za redukcijo torzijskega obnašanja, ki neenakomerno obremeni konstrukcijske elemente. V ta namen je ugodna razporeditev nosilnih elementov po zunanem obodu konstrukcije. Neelastične zahteve v spojih zaradi torzije so visoke. Takšni spoji običajno predstavljajo šibke člene, ki imajo ustrezno togost, nosilnost in duktilnost, in delujejo kot varovalka za ostale elemente konstrukcije.
- Sposobnost prenosa obremenitev preko toge plošče
Plošče se v konstrukcijah obnašajo kot horizontalne diafragme, saj zbirajo in razporejajo inercialne sile na vertikalne elemente (stebre ali stene). Delovanje togih plošč je posebno pomembno pri kompleksnih in neenakomernih tlorisih konstrukcij ali v primeru uporabe vertikalnih elementov z različno togostjo. Toge plošče ali diafragme morajo imeti veliko togost in nosilnost v svoji ravnini.
- Ustrezno temeljenje
Togi in nosilni temelji in njihova povezava s konstrukcijo zagotavljajo, da je celotna konstrukcija obtežena z enakomerno seizmično obtežbo. Temelji morajo biti med seboj povezani z nosilci v obeh smereh ali s temeljno ploščo.

S primerno zasnovano konstrukcijo, dimenzioniranjem, konstruiranjem in izvedbo lahko zagotovimo varnost konstrukcij med potresi, kar prikazuje tudi slika 13. Vidne so posledice na sosednjih hišah po potresu *L'Aquila* (Italija, april 2009). Hiša na skrajni desni se je povsem porušila, na sosednji hiši so vidne poškodbe, medtem, ko je hiša na skrajni levi prestala potres celo brez poškodb.



Slika 13: Različno poškodovane hiše v vasi *Onna*, Italija, zaradi potresa *L'Aquila*

3 OPIS IN UPORABA POTRESNE MIZE *QUANSER STII*

3.1 Namen potresne mize

Samo s skrbnim načrtovanjem in dobro izvedbo lahko varujemo človeška življenja in minimiziramo neposredno in posredno škodo, ki se lahko pojavi zaradi močnih potresov. Zato je zagotovitev ustrezne potresne varnosti eden izmed ključnih kriterijev pri projektiranju in izvedbi gradbenih konstrukcij. Čeprav je razumevanje dinamičnega obnašanja konstrukcij osnovnega pomena v modernem projektiranju po vsem svetu, je poznavanje odziva konstrukcij med delovanjem časovno spremenljivih obtežb še razmeroma skromno predvsem, če govorimo o potresnem odzivu konstrukcij, ki je blizu porušitve.

Potresi so relativno kratkotrajni in redki pojavi, zato si za njihovo preučevanje pomagamo s strojno opremo, ki simulira premikanje tal med delovanjem potresov, in jo imenujemo potresna miza. Na potresno mizo se pritrdi model konstrukcije, preizkušane, katerega obnašanje se nato opazuje med simulacijo potresa. Številni eksperimenti na potresnih mizah po vsem svetu se izvajajo z namenom, da bi čim boljše razumeli obnašanje konstrukcij med močnimi potresi in tako zmanjšali potresno tveganje. Rezultati eksperimentov, ki so izvedeni na potresnih mizah, služijo tudi za razvoj analitičnih metod. Prav tako so lahko eksperimenti na potresnih mizah učinkovit način predstavljanja osnov v dinamiki gradbenih konstrukcij in potresnem inženirstvu. Osnovne frekvence konstrukcij, njihove nihajne oblike in podobne značilnosti specifične za dinamiko konstrukcij so lahko z eksperimenti jasno predstavljene. Za učenje obnašanja konstrukcij med potresi je uporabno, da se lahko spreminja dinamične lastnosti preizkušancev, izbira različne vhodne podatke potresov, meri in analizira odziv preizkušancev.

Potresne mize se uporabljajo za eksperimentalne raziskave v potresnem inženirstvu. Nove zasnove in tehnike so pogosto preizkušene na modelih konstrukcij z uporabo potresnih miz pred uporabo na realnih konstrukcijah, saj je računalniška simulacija potresnega odziva konstrukcij še vedno precej omejena. Potresne mize so razmeroma draga strojna oprema, zato je njihovo število in dostop do dela na njih zelo omejen.

Manjše ali t.i. šolske potresne mize so idealna alternativa za zagotovitev dostopa do izvajanja in spremljanja eksperimentov za učenje osnov dinamike gradbenih konstrukcij. V tem primeru se lahko opazuje potresne odzive, projektira in gradi modele konstrukcij, spreminja njihove zasnove, meri odzive preizkušancev in reproducira različne potresne zapise. Poleg tega so šolske potresne mize dovolj majhne za prenos na različne lokacije za potrebe prikaza potresnega delovanja.

Glavni cilji dela na šolskih potresnih mizah so:

- razvijanje razumevanja in intuicije za dinamično obnašanje konstrukcij,
- okrepitev teoretičnega znanja s praktičnimi poskusi,
- pridobitev izkušnje dela z modernimi inženirskimi pripomočki – merilne naprave, programska oprema za zbiranje podatkov, ...
- predstavitev morebitnih posledic potresov na konstrukcijah za arhitekto, geotehniko, in ostale inženirje, ki so vključeni v proces graditve,
- ozaveščanje splošne javnosti o potresni nevarnosti in informiranje o pristopih za varno gradnjo in zmanjšanje potresnih posledic in
- raziskovalne možnosti.

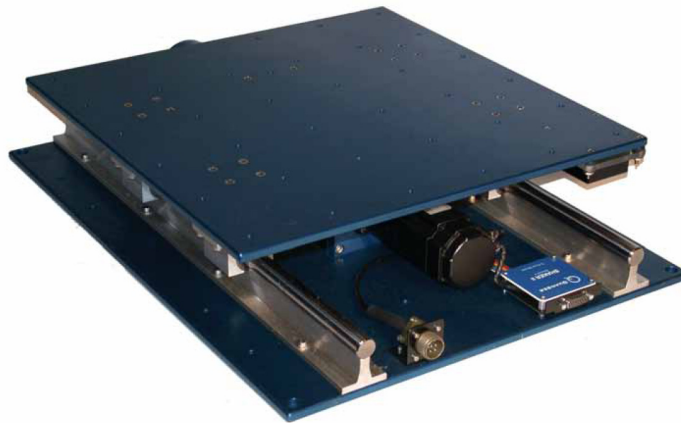
Uporabo šolskih potresnih miz širi Združenje univerz za šolske potresne mize (*University Consortium on Instructional Shake Tables - UCIST*), v katerega je vključena tudi Univerza v Ljubljani. Združenje *UCIST* si prizadeva okrepiti znanje dinamike gradbenih konstrukcij, projektiranja potresnoodporne gradnje, geotehničnega projektiranja in podobnih področij povezanih s potresnim inženirstvom. *UCIST* uvaja v študijske programe eksperimentalni pristop k poučevanju potresnega inženirstva s pomočjo šolskih potresnih miz, ki so namenjene uporabnikom z različnim predznanjem (Dyke, Caicedo, 2002).

UCIST je bilo v začetku združenje 23 univerz povezanih s tremi ameriškimi nacionalnimi potresnimi centri (*Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER)* in *Mid-America Earthquake Center (MAE)*). Trenutno je v združenju več kot 100 univerz iz vsega sveta, kar prinaša močan vpliv v izobraževanje gradbeništva. Centrala združenja *UCIST* je na univerzi

Washington University v mestu *St. Louis*. Informacije o uporabi šolskih potresnih miz za poučevanje, nadgradnje programske opreme za delo s potresnimi mizami, opisi in posnetki nekaterih eksperimentov, predstavitve, članki in priročniki o tej temi so dostopni na spletni strani združenja *UCIST*.

3.2 Opis potresne mize

Potresna miza *Shake Table II (STII)* podjetja *Quanser*, ki je prikazana na spodnji sliki, je namenjena poučevanju in je bila razvita za združenje *UCIST*.



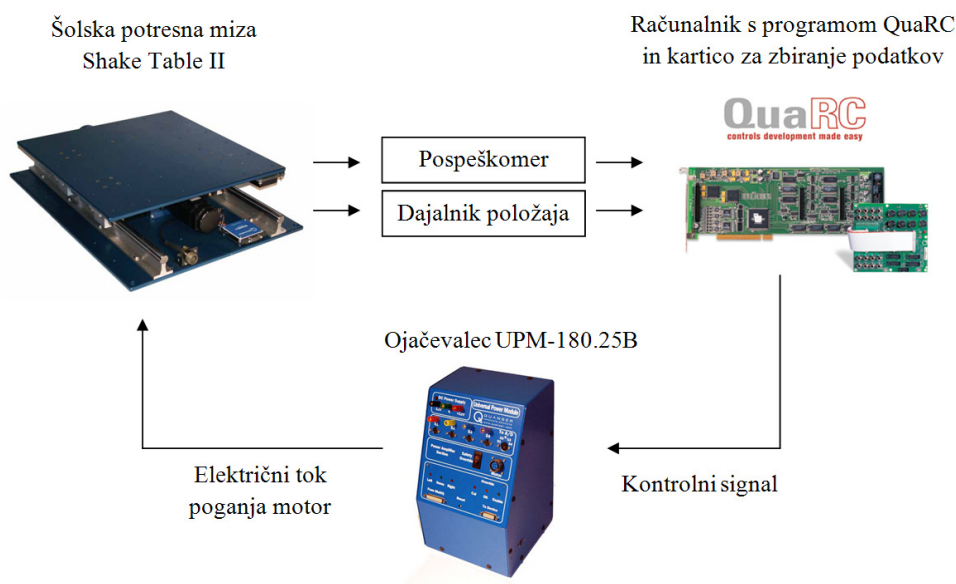
Slika 14: Potresna miza *Shake Table II*

Zgornjo ploščo potresne mize premika motor, ki omogoča doseganje pospeškov do 2.5 g, če je na mizo dodane do 7.5 kg mase. Zgornja plošča se vozi po dveh kovinskih tračnicah, ki sta pritrjeni na spodnjo ploščo. Linearni ležaji zagotavljajo gladko linearno premikanje z minimalno napako. Zgornja plošča se lahko premakne iz središčne pozicije za 7.62 cm (3 in) na vsako stran, kar pomeni možen skupen premik za 15.24 cm. Za pogon se uporablja 400W motor s trajnimi magneti. Vgrajen ima dajalnik položaja z visoko ločljivostjo, ki meri položaj zgornje plošče na 3.10 μm natančno. Na zgornjo ploščo je pritrjen analogen pospeškometer, ki direktno meri pospeške plošče.

3.2.1 Sistem komponent *STII*

Najpomembnejše naprave za delovanje potresne mize so prikazane na sliki 15. Celoten sistem sestavljajo:

- ojačevalec (*Universal Power Module – UPM*),
- kartica za pridobivanje podatkov (*data-acquisition (DAC) card*),
- računalnik s programsko opremo za upravljanje podatkov (*QuaRC control software*) in
- potresna miza *STII*.



Slika 15: Pregled najpomembnejših komponent sistema

Prenos signala med komponentami sistema in delovanje potresne mize najlažje opišemo na primeru. Predpostavimo, da uporabnik želi, da potresna miza sledi sinusnemu premikanju, kot rezultat pa ga zanimajo pospeški. Za vzpostavitev takšnega primera mora uporabnik preko programske opreme *Quanser Real-Time Control (QuaRC)* na računalniku določiti amplitudo in frekvenco sinusnega nihanja. Določeno sinusno nihanje je zahtevana pozicija potresne mize. Električni tok, ki je potreben za premikanje plošče po sinusnem nihanju, je izračunan s programom *QuaRC* in poslan skozi analogni izhod kartice za zbiranje podatkov do ojačevalca. Električni tok iz ojačevalca nato poganja motor, ki premika potresno mizo po položaju in frekvenci določenega sinusnega nihanja. Premiki in pospeški plošče se merijo z

dajalnikom položaja in pospeškometerom, ki sta povezana s kartico za zbiranje podatkov. Zbrane signale se lahko obdeluje in prikaže s programom *QuaRC*. Podatke se lahko tudi shrani in natisne za kasnejšo analizo.

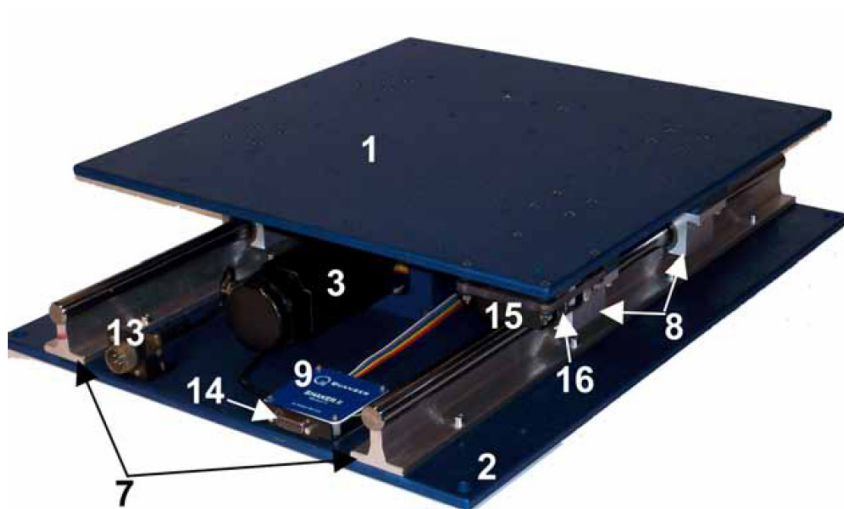
Opis potrebne programske opreme in postopek povezave posameznih komponent sistema za izvajanje eksperimentov na potresni mizi *STII* je podrobno opisan v priročniku potresne mize (Shake Table II, User Manual, 2008).

3.2.2 Sestavni deli potresne mize *STII*

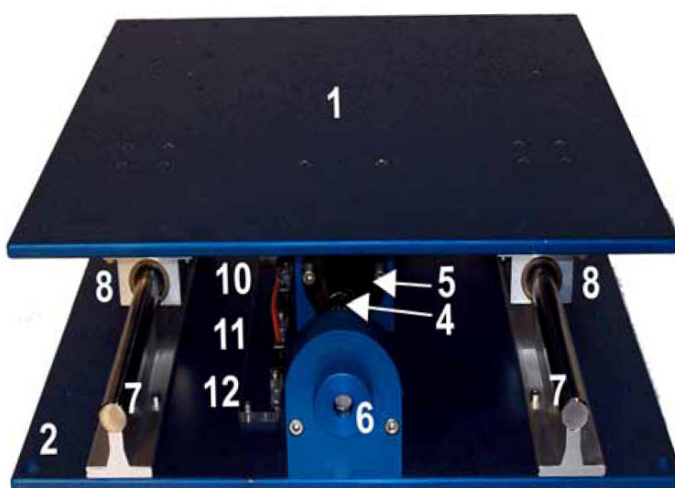
Sestavni deli potresne mize so predstavljeni v preglednici 1 ter na slikah 16 in 17. Glavne lastnosti potresne mize *STII* so podane v preglednici 2. Nekatere sestavne dele potresne mize *STII* podrobno opišemo v nadaljevanju.

Preglednica 1: Pregled sestavnih delov potresne mize *STII*

Št.	Opis	Št.	Opis
1	Zgornja plošča	9	Preklopnik
2	Spodnja plošča	10	Levi mejni senzor
3	Motor	11	Senzor v centralni poziciji
4	Vodilni vijak	12	Desni mejni senzor
5	Vodilo zgornje plošče	13	Vtikač za motor
6	Vijak za ročno nastavljanje	14	Vtikač za dajalnik položaja in <i>Hall-ove</i> senzorje
7	Kovinski tračnici	15	Pospeškometer
8	Linearni ležaji	16	Priključek za pospeškometer



Slika 16: Zgornji pogled na sestavne dele potresne mize *STII*



Slika 17: Prednji pogled na sestavne dele potresne mize *STII*

Preglednica 2: Lastnosti potresne mize *STII*

Parameter	Oznaka v programu <i>Matlab</i>	Opis	Vrednost	Enote
R_m	Rm	Upornost navitja motorja	2.94	Ω
K_t	Kt	Konstanta tok – navor motorja	0.360	Nm/A
K_m	Km	Konstanta elektromagnetne indukcije motorja	0.2034	V/(rad/s)
P_b	Pb	Navoj vodilnega vijaka	0.0127	m/obrat
M_p	Mp	Masa zgornje plošče	7.74	kg
M_{l_max}	Ml_max	Maksimalna celotna masa	15.0	kg
M_s	Ms	Masa potresne mize <i>STII</i>	27.2	kg
		Dimenzije zgornje plošče	0.46×0.46	m ²
		Dimenzije spodnje plošče	0.61×0.46	m ²
		Višina od spodnje do zgornje plošče	12.4	cm
x_{max}	P_MAX	Maksimalen pomik	76.2	mm
v_{max}	VEL_MAX	Maksimalna hitrost	664.9	mm/s
F_{max}	F_MAX	Maksimalna sila	708.7	N
g_{max}	G_MAX	Maksimalni pospešek pri 0 kg dodatne mase	2.50	g
K_{ENC}	K_ENC	Umeritev dajalnika položaja	3.1006	$\mu\text{m}/\text{števil}$
K_{ACC}	K_ACC	Umeritev pospeškomera	-1	g/V
		Dovoljena dinamična obremenitev vodila zg. plošče	12000	N
		Življenjska doba vodila zg. plošče pri polni obtežbi	6.35×10^8	m
		Življenjska doba linearnih ležajev	6.35×10^6	m
		Nosilnost linearnih ležajev	131.5	kg

Zgornja plošča

Dimenzije zgornje plošče so podane v spodnji preglednici. Zgornja plošča ima pripravljenih veliko mest, na katere lahko pritrdimo modele konstrukcij.

Preglednica 3: Dimenzije zgornje plošče

Opis	Vrednost	Enota
Dolžina	45.7	cm
Širina	45.7	cm
Debelina	0.97	cm

Spodnja plošča

Nosilna spodnja plošča, na katero sta pritrjena tudi tračnici in vodilni vijak, je prikazana na slikah 16 in 17 s številko 2, njene dimenzije pa so zapisane v spodnji tabeli. Na vogalih plošče so 4 velike luknje, po robovih plošče pa še vrsta manjših. Te služijo za pritrditev potresne mize na tla, da se prepreči premikanje sistema oz. se zmanjša neželjene vibracije. Čeprav to ni nujno, se priporoča z namenom pridobivanja natančnih podatkov, predvsem za merjenje pospeškov.

Preglednica 4: Dimenzije spodnje plošče

Opis	Vrednost	Enota
Dolžina	60.9	cm
Širina	45.7	cm
Debelina	1.24	cm

Motor

Potresno mizo poganja 400W motor s trajnimi magneti, *Kollmorgen AKM24*. Povezan je z vijakom, ki poganja vodilo zgornje plošče. Pri motorju s trajnimi magneti je preklon med

fazami izveden s pomočjo *Hall*-ovih senzorjev, zamaknjenih za 120° . Nekaj tehničnih podatkov motorja je zapisanih v preglednici 4.

Vodilni vijak

Motor vrti vodilni vijak, ki kroži skozi vodilo zgornje plošče potresne mize. Ta se premakne za 1.24 cm (0.5 in) na obrat vodilnega vijaka.

Dajalnik položaja

Dajalnik položaja je vgrajen v motor in se uporablja za merjenje linearnega položaja mize. Ni viden navzven. Minimalen linearen pomik, ki ga dajalnik položaja lahko zazna je $3.1 \mu\text{m}$.

Linearni ležaji

Za gladko premikanje je zgornja plošča na tračnici pritrjena preko linearnih ležajev z majhnim trenjem.

Mejna stikala

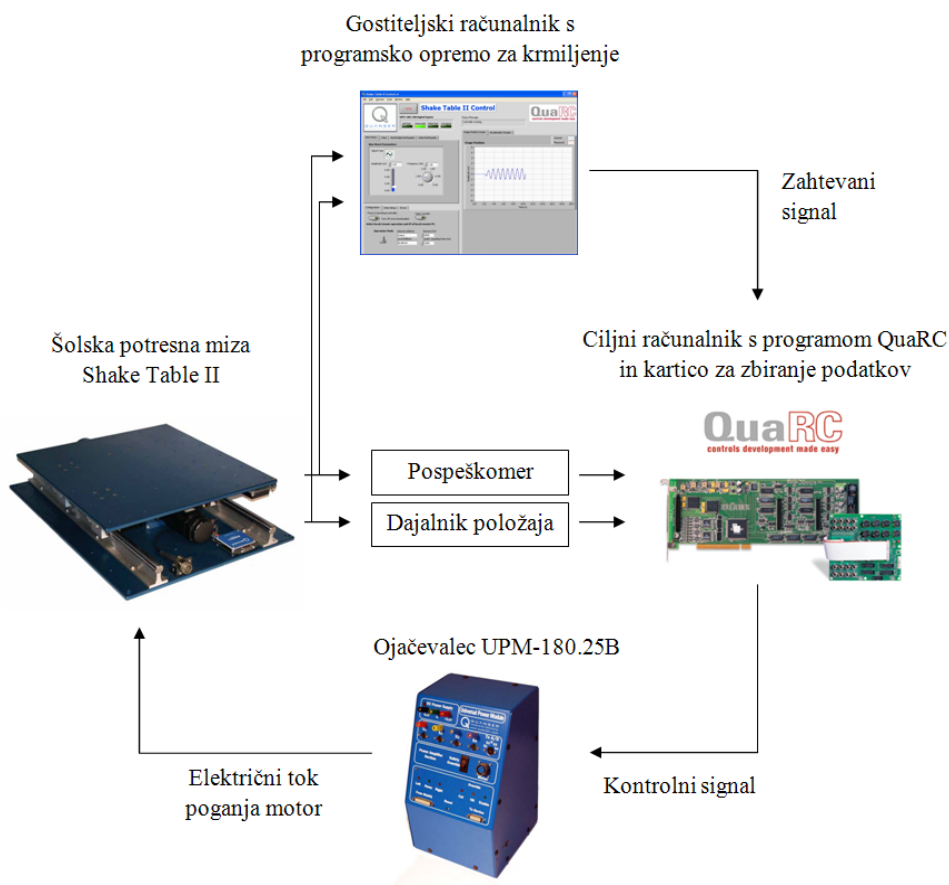
Levi in desni mejni senzor se sprožita, ko se zgornja plošča približa levi ali desni mehanski meji. Podobno se sproži sredinski senzor, ko se zgornja plošča nahaja v centralnem položaju. Na podlagi zaznav levega in desnega mejnega sensorja se zaradi varnosti ugasne ojačevalec, glede na sredinski senzor pa se uravnava mizo v središčni položaj.

Pospeškometer

Dvoosni *ADXL210E* pospeškometer je pritrjen pod zgornjo ploščo. Pospeškometer meri pospešek zgornje plošče v dveh ortogonalnih smereh, x in y, in ima območje delovanja $\pm 10 \text{ g}$. Napaka v operativnem območju mize znaša $\pm 5.0 \text{ mV}$, kar je $\pm 5.0 \text{ mg}$. Analogni senzor je kalibriran tako, da 1 V ustreza 1 g ali 9.81 m/s^2 .

3.3 Upravljanje potresne mize

Spodnja slika prikazuje, kako se v sistem komponent vključuje programska oprema, s katero krmilimo premikanje potresne mize.



Slika 18: Prikaz sistema komponent *STII* s programsko opremo za krmiljenje

Računalnik, ki je povezan s potresno mizo se imenuje ciljni računalnik. Računalnik, ki poganja programsko opremo za krmiljenje potresne mize gostiteljski računalnik. Če se vse poganja lokalno na enem računalniku, je ciljni in gostiteljski isti računalnik. Vendar je lahko ciljni računalnik tudi oddaljen računalnik.

Potresno mizo kontrolira ciljni računalnik z uporabo prednastavljenih *QuaRC* kontrolerjev. Kot je prikazano na zgornji sliki, programska oprema za krmiljenje pošilja zahteve glede položaja *QuaRC* kontrolerju in prejema podatke o poziciji in pospeških za izris. Preko

programske opreme za krmiljenje se lahko *QuaRC* kontroler naloži na ciljni računalnik, se ga požene, ustavi itd.

Zahtevani signal o premikanju potresne mize se lahko iz računalnika pošilja na 2 načina. Uporabi se lahko enostaven program *Shake Table II Software* oz. se zaganja eksperimente preko programa *Matlab*.

Program *Shake Table II Software* omogoča uporabniku poganjanje vnaprej pripravljenih kontrolerjev in ne omogoča modificiranja, niti ustvarjanja novih kontrolerjev. Uporabnik lahko zaganja sinusno nihanje pri različnih amplitudah in frekvencah, sinusni signal s povečevanjem frekvence in dva primera dejanskih potresov (Kobe 1995 in Northridge 1994).

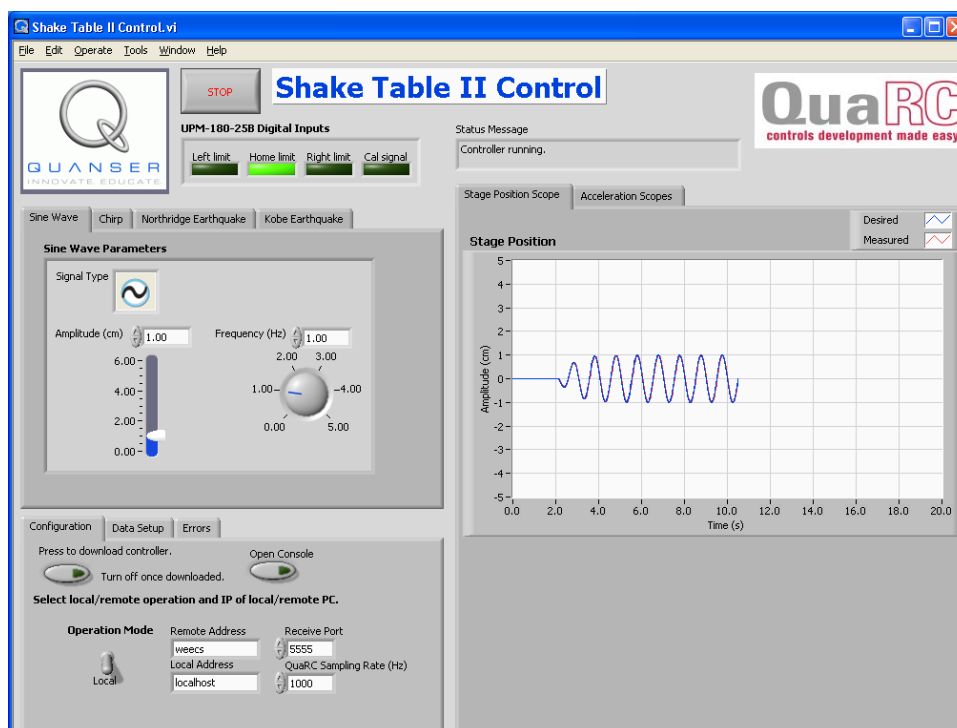
Preko programske opreme *Matlab* lahko uporabnik poganja vnaprej pripravljene kontrolerje in poleg tega modificira in ustvarja nove kontrolerje. Za to je zahtevan *Matlab/Simulink* paket. Tak način vodenja eksperimentov omogoča tudi naprednejšo analizo rezultatov.

Pred začetkom dela s potresno mizo, velja opozorilo, da se v primeru, ko gre med eksperimentom na potresni mizi karkoli narobe, pritisne rdeči gumb na stikalu za zasilno zaustavitev, kar v trenutku onemogoči ojačevalec in izključi motor.

3.3.1 Upravljanje mize s programsko opremo *Shake Table II Software*

Najlažje je začeti z delom na potresni mizi s pomočjo programa *Shake Table II Software*. Podroben opis programa je narejen v priročniku (Shake Table Software, User Guide, 2008). Program je enostaven za uporabo, saj ima uporabniku prijazen vmesnik (slika 19), s katerim lahko simuliramo naslednje štiri različne vrste gibanja tal:

1. Sinusno nihanje – spreminja se lahko amplituda in frekvenca.
2. Signal *chirp* – sinusno nihanje, ki povečuje frekvenco od 1 Hz do 5 Hz v 30 sekundah. Amplituda se lahko spreminja, vendar je med eksperimentom konstantna.
3. Potres Northridge 1994 – potresna miza sledi premikom, ki ponovijo zabeležene pospeške dejanskega potresa Northridge.
4. Potres Kobe 1995 – potresna miza sledi premikom, ki ponovijo zabeležene pospeške dejanskega potresa Kobe.



Slika 19: Program *Shake Table II Software*

Program sprti prikazuje željeno in izmerjeno pozicijo mize ter tri diagrame pospeškov, ki jih dobimo s tremi pospeškometri, če so nameščeni.

Za izvajanje eksperimentov na potresni mizi moramo izvršiti naslednje procese:

1. Zagotovimo, da je potresna miza povezana s ciljnim računalnikom.
2. Če poganjamo potresno mizo na daljavo, prižgemo oddaljen ciljni računalnik.
3. Ko je oddaljen računalnik zagnan, zagotovimo, da je dostopen preko omrežja na gostiteljskem računalniku z ukazom ping. Na primer, če se oddaljeni računalnik imenuje *pc*, vtipkamo v *Command Prompt* na gostiteljskem računalniku *ping pc* in zagotovimo, da je ciljni računalnik dosegljiv.
4. Prižgemo ojačevalca *UPM-180-25B*.
5. Zaženemo program *Shake Table II Software* in odpreti se mora okno, ki je prikazano na sliki 19.
6. Preden se zažene kontroler, se avtomatsko izvede inicializacija ojačevalca. Zatem se miza pomakne v centralno pozicijo, če je bila pred tem izmaknjena iz nje. Nato začne miza avtomatsko slediti sinusnemu nihanju, katerega amplitudo (0 - 6 cm) in frekvenco (0 – 5 Hz) lahko med eksperimentom poljubno spreminjamo.
7. Če se ne izvede postopek, ki je opisan pod točko 6, pritisnemo na gumb, nad katerim piše *Press to download controller* in pritisnemo na belo puščico v zgornjem levem kotu. S tem se naloži kontroler na ciljni računalnik, kar omogoča kontroliranje potresne mize. To je potrebno narediti le, ko je ciljni računalnik prvič zagnan. Ko se kontroler naloži, ta gumb izklopimo.
8. Signal *chirp* predstavlja sinusno nihanje, ki povečuje frekvenco od 1 Hz do 5 Hz v 30 sekundah. Takšen signal je uporaben za identifikacijo lastnih frekvenc konstrukcije. Amplituda se lahko spreminja od 0 do 0.4 cm. Po 30 sekundah se signal avtomatsko ponovno zažene.
9. Potres Northridge ali Kobe: Ko je izbran eden izmed teh dveh zavihkov, začne potresna miza simulirati izbran potres. Premiki in frekvence potresa so kalibrirani, da ustrezajo omejitvam potresne mize, pospeški pa so enaki tistim, ki so bili zabeleženi ob dejanskem potresu. Signal se ob koncu avtomatsko ponovi.
10. Za ustavitev pritisnemo na gumb Stop.

3.3.2 Upravljanje mize s programsko opremo *Matlab/Simulink*

Potresno mizo se lahko vodi tudi z uporabo programa *Matlab*. Najprej se pripravi *Simulink* diagram, iz katerega se nato generira kontroler za določen proces, ki določa kako naj se premika potresna miza.

Pet standardnih kontrolerjev za potresno mizo *STII*:

1. Inicializacija ojačevalca: ojačevalec se pripravi za uporabo. To mora biti narejeno vsakič pred izvajanjem kakršnegakoli eksperimenta.
2. Kalibracija mize, premik v centralno lego: zgornja plošča se premakne v centralno lego, kjer se mora nahajati pred začetkom vsakega eksperimenta.
3. Sinusno nihanje: potresna miza sledi sinusnem nihanju, katerega amplitudo in frekvenco se lahko spreminja.
4. Sinusno nihanje s povečevanjem frekvence: potresna miza sledi signalu *chirp*.
5. Prednastavljena pot: potresna miza simulira gibanje tal med potresom ali sledi signalu sestavljenega sinusnega nihanja.

Za izvajanje eksperimentov na potresni mizi moramo izvršiti naslednje procese:

1. Priključimo vse električne vodnike, prižgemo računalnik in ojačevalec
2. Zaženemo program *Shake Table II Software* za inicializacijo in ga nato zapremo.
3. Zaženemo program *Matlab R2008a*. Vse verzije programa *Matlab* in *QuaRC* med seboj niso združljive. Združljivi sta verziji *Matlab R2008a* in *QuaRC 1.1*. *Matlab* mora imeti vgrajena tudi orodja *Simulink*, *Control System Toolbox* in *Real-Time Workshop*.
4. S funkcijo *Set Path* določimo, da *Matlab* zbira podatke tudi iz mape *Quanser* v kateri so vse knjižnice, ki se jih potrebuje za pravilno delovanje.
5. Nastavimo delovno območje na mesto, kjer so shranjeni pripravljene *Simulink* diagrami in ostale datoteke potrebne za delo s potresno mizo, npr.: *C:\ST2\QuaRC 1.1*. Te datoteke so naložene na zgoščenki, vendar jih je potrebno pred uporabo prenesti na trdi disk.
6. Dvakrat kliknemo na skripto *setup.m*. Nastavimo lahko revizijo potresne mize *STII*, uporabo angleških ali metričnih enot, tip ojačevalca in maksimalno izhodno napetost

- kartice za zbiranje podatkov. Večine teh nastavitvev se ne spreminja, saj so že nastavljene tako kot je potrebno.
7. Poženemo skripto *setup.m*. S tem se naložijo vsi potrebni parametri v delovno področje v programu *Matlab*. Ta skripta mora biti zagnana le enkrat v začetku preden se začne iz *Simulink* diagramov delati kontrolerje.
 8. Odpremo *q_boot_upm.mdl*. Ko se prižge ojačevalec, utripata na njegovi sprednji strani dve rdeči lučki. To pomeni, da ojačevalec ni pripravljen in v tem stanju ne more poganjati motorja potresne mize. Za inicializacijo in s tem ustavitev utripanja lučk poženemo *q_boot_upm.mdl*. Nastaviti je potrebno vrsto kartice za zbiranje podatkov, ki se jo uporablja. Dvokliknemo na *HIL Initialize* blok in izberemo kartico *q4* in pritisnemo *OK*. Shranimo *Simulink* diagram in nato izberemo *QuaRC|Build*. Ko se kontroler pripravi in naloži, izberemo *QuaRC|Start*. Zdaj se pojavi okno, ki sporoča, da je ojačevalec inicializiran, lučke se ugasnejo in pripravi se datoteka *q_boot_upm-rt.windows*, ki omogoča zaganjanje tega kontrolerja neposredno iz programa *Windows Explorer*. Ojačevalec je pripravljen za nadaljnje delo s potresno mizo.
 9. Odpremo *q_cal.mdl*. Preden se naredi katerikoli eksperiment na potresni mizi mora biti ta kalibrirana oz. postavljena v centralno pozicijo. Postopek je podoben kot pri koraku 8. Najprej nastavimo pravo kartico za zbiranje podatkov in diagram shranimo. Nato izberemo *QuaRC|Build* in zatem *QuaRC|Start*. Potresna miza se začne premikati in se ustavi, ko pride v centralno pozicijo. Na sprednji strani ojačevalca gori zelena lučka, ki označuje, da je miza v centralni poziciji. Ustvari se datoteka *q_cal-rt.windows*, ki omogoča, zaganjanje kontrolerja neposredno iz programa *Windows Explorer*. Možna je tudi ročna kalibracija z vijakom za ročno nastavljanje, ki je na sliki 17 označen s številko 6.
 10. Ponovno zaženemo kontroler, ki inicializira ojačevalec, saj je to potrebno storiti pred vsako operacijo. Ker je bil kontroler že pripravljen pod točko 8, se ga tokrat le zažene. Odpremo *q_boot_upm.mdl* in izberemo *QuaRC|Start* ali pa v programu *Windows Explorer* naredimo dvoklik na *q_boot_upm-rt.windows*.
 11. Zaženemo eksperiment, ki ga želimo narediti. Na razpolago je več možnosti, ki so opisane v poglavjih 3.3.2.2 do 3.3.2.4 (sinusno nihanje, sinusno nihanje s povečevanjem frekvence, prednastavljena pot).
 12. Zaženemo kontroler, ki inicializira ojačevalec.

13. Če potresna miza ni v centralni poziciji, jo kalibriramo.
14. Zaženemo kontroler, ki inicializira ojačevalec.
15. Zaženemo eksperiment, ki ga želimo narediti.
16. Itd.

3.3.2.1 Sinusno nihanje

Pri tem eksperimentu potresna miza sledi sinusnemu signalu, kateremu se lahko spreminja amplituda in frekvenca.

Signal zaženemo tako, da odpremo *q_sine.mdl*, izberemo pravo kartico za zbiranje podatkov *q4*, shranimo *Simulink* diagram, izberemo *QuaRC|Build* in zatem *QuaRC|Start*.

Med potekom eksperimenta lahko spremljamo različne diagrame, ki prikazujejo spreminjanje vrednosti v realnem času. Nekateri diagrami prikazujejo dve črti, kjer pomeni rumena krivulja oddani signal, z vijoličasto krivuljo pa je prikazana merjena pozicija ali pospešek mize.

Med eksperimentom se lahko spreminja amplituda in frekvenca nihanja. Dobro je, da se pred zaključkom eksperimenta nastavi amplitudo na vrednost 0, s čimer se zagotovi, da se miza vrne nazaj v centralno pozicijo. Za zaključek eksperimenta kliknemo na gumb Stop.

3.3.2.2 Sinusno nihanje s povečevanjem frekvence

Signal, ki se ga v angleščini označuje kot *sine sweep* ali *chirp signal*, je sinusni signal s konstantno amplitudo in naraščajočo frekvenco. Takšen signal je uporaben za določanje frekvenčnega odziva konstrukcij in lastnih frekvenc konstrukcij.

Signal zaženemo tako, da odpremo *q_sweep.mdl*, izberemo pravo kartico za zbiranje podatkov *q4*, shranimo *Simulink* diagram, izberemo *QuaRC|Build* in zatem *QuaRC|Start*.

Miza se začne premikati in se po končanem signalu avtomatsko ustavi. Spreminja se lahko amplituda pri kateri poteka eksperiment, pa tudi začetna in končna frekvenca in čas trajanja eksperimenta. Pazimo na podane vrednosti teh parametrov, da ti ne presegajo zmogljivosti potresne mize.

3.3.2.3 Prednastavljena pot

Zapisani potresni podatki, ki so bili zbrani med dejanskimi potresi, se lahko primerno obdelajo in ponovno poganjajo na potresni mizi. Osnovni podatki, ki služijo za simulacijo so zabeleženi pospeški. Poleg tega se lahko ustvari podatke, po katerih bo potresna miza sledila sestavljenemu sinusnemu nihanju.

Signal zaženemo tako, da odpremo *q_data.mdl*, izberemo pravo kartico za zbiranje podatkov *q4*, shranimo *Simulink* diagram, poženemo skripto *make_quake.m* ali *make_sine.m* (ti skripti sta kratko opisani v poglavjih 3.3.2.5 in 3.3.2.6), izberemo *QuaRC|Build* in zatem *QuaRC|Start*.

Potresna miza začne simulirati potres ali sledi sestavljenemu sinusnemu nihanju in se po končanem signalu avtomatsko ustavi.

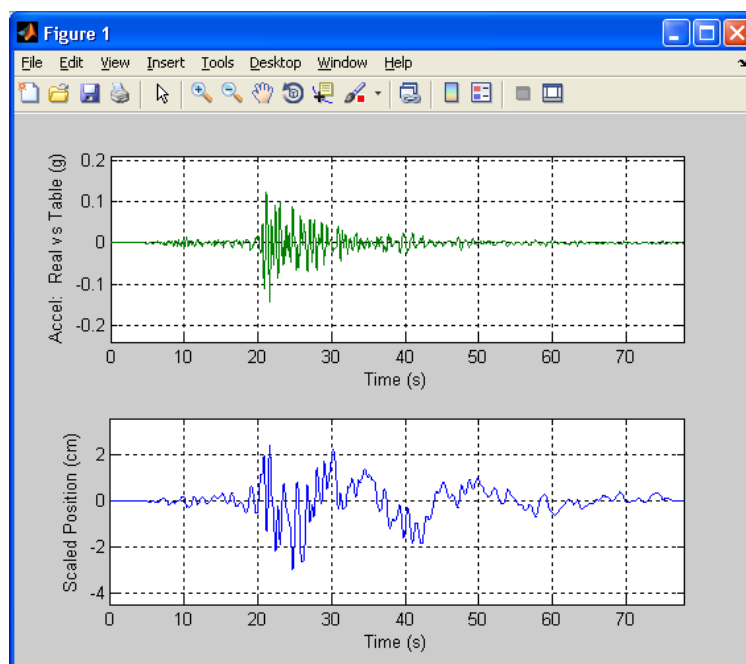
Simuliranje potresov

Skripta *make_quake.m* pripravi trajektorijo, ki se jo lahko uporabi v *Simulink* diagramu za prednastavljeno pot, in se jo poganja na potresni mizi. Trajektorija je zahtevana pozicija, ki ji mora slediti potresna miza z namenom simuliranja enakih pospeškov kot pri zabeleženih zgodovinskih potresih.

V skripti *make_quake.m* je potrebno podati ime datoteke s podatki o potresu, katerega želimo simulirati, in maksimalni pomik potresne mize, ki ne sme biti večji od 7.62 cm, kar je strojna omejitev potresne mize. Če je določen maksimalni pomik potresne mize drugačen od zabeleženega maksimalnega pomika med dejanskim potresom, se temu primerno skrajša ali

podaljša signal potresa. S tem se zagotovi simulacijo enakih pospeškov kot so bili zabeleženi v naravi med dejanskim potresom.

Na sliki 20 je prikazan na zgornjem diagramu željen pospešek potresne mize in zabeležen pospešek med dejanskim potresom. Diagrama teh dveh pospeškov sta enaka, zato ležita drug na drugem. Na spodnjem diagramu na sliki 20 je prikazana prilagojena pozicija potresne mize glede na maksimalni pomik.



Slika 20: Pospešek zabeležen med potresom *Kobe* 1995 in prilagojena zahtevana pot

Podatke o zabeleženih pospeških tal med dejanskimi potresi je mogoče dobiti preko spleta v različnih bazah podatkov, npr.:

- Baza *PEER* (<http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>) in
- Baza *NCEER* (<http://www.ldeo.columbia.edu/nceer/strongmo.html>).

Določanje sestavljenega sinusnega nihanja

Skripta za *Matlab* z imenom *make_sine.m* generira sestavljeno sinusno nihanje, ki se lahko uporabi v *Simulink* diagramu za prednastavljeno pot. Poda se amplitude sinusnih nihanj $A_d = [A_1, A_2, \dots, A_n]$ in pripadajoče frekvence $f_d = [f_1, f_2, \dots, f_n]$. Iz teh podatkov se izračuna željena pot potresne mize

$$x_d = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t), \quad (10)$$

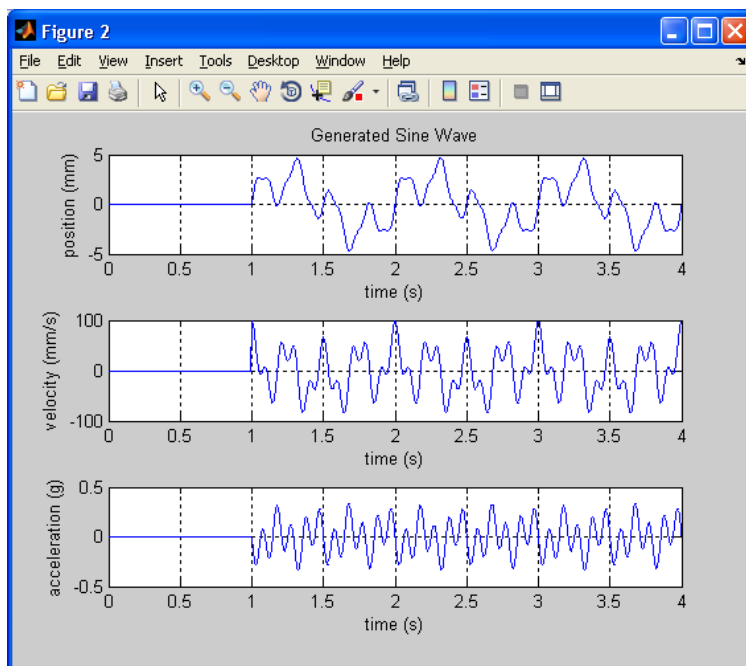
hitrost

$$v_d = 2A_1 \cos(2\pi f_1 t)\pi f_1 + 2A_2 \cos(2\pi f_2 t)\pi f_2 + \dots + 2A_n \cos(2\pi f_n t)\pi f_n \quad (11)$$

in pospešek

$$a_d = -4A_1 \sin(2\pi f_1 t)\pi^2 f_1^2 - 4A_2 \sin(2\pi f_2 t)\pi^2 f_2^2 - \dots - 4A_n \sin(2\pi f_n t)\pi^2 f_n^2. \quad (12)$$

Ojačevalc je pred vsakim začetkom eksperimenta onemogočen za 0.7 s, zato je prva sekunda željenega pomikanja potresne mize vedno podana z ničlami, kar je dobro vidno na spodnji sliki. Celotno trajanje signala je zaradi tega vedno daljše za eno sekundo. Slika 21 prikazuje zahtevane podatke za prednastavljeno pot generirano s sestavljenim sinusnim nihanjem.



Slika 21: Željeni pomiki, hitrost in pospeški potresne mize za primer sestavljenega sinusnega nihanja

3.3.2.4 Izpis rezultatov

Vsi kontrolerji, z izjemo kontrolerjev za inicializacijo in kalibracijo potresne mize, imajo vgrajene diagrame, ki prikazujejo vrednosti med potekom eksperimenta. Seznam diagramov je predstavljen v spodnji preglednici.

Preglednica 5: Diagrami za analizo rezultatov

Graf in enote	Spremenljivka	Opis
x (m)	x	Prikazuje dve krivulji: Rumena krivulja je željena pozicija potresne mize Vijolična krivulja je izmerjena pozicija potresne mize
v (m/s)	v_x	Hitrost potresne mize izračunana iz merjene pozicije
x_ddot (g)	$a_{x,enc}$	Pospešek potresne mize izračunan iz merjene pozicije
I_m (A)	I_m	Vhodni električni tok v motor
a_tbl (g)	a_g	Prikazuje dve krivulji: Rumena krivulja je željeni pospešek potresne mize Vijolična krivulja je izmerjeni pospešek potresne mize s pospeškometerom

Kontrolerji imajo vgrajeno možnost za prikazovanje dveh dodatnih grafov s pospeški, če sta priključena še dva pospeškometera.

Grafe za pot in hitrost je možno prikazovati tudi v angleških enotah, grafe za pospešek pa v enotah m/s^2 .

Željena in izmerjena pozicija potresne mize se pri eksperimentih dobro ujemata, zato se na grafu krivulji navadno prekrivata. Na grafu, ki prikazuje pospeške, se izrisujeta obe krivulji željenih in izmerjenih pospeškov le v primeru simulacije dejanskih potresov in sestavljenega sinusnega nihanja. V primeru sinusnega nihanja in sinusnega nihanja z naraščajočo frekvenco željeni pospešek ni definiran, zato se izrisuje le izmerjeni pospešek.

Nekateri grafi se odprejo samodejno z odprtjem *Simulink* diagramov, druge lahko uporabnik zažene ročno z dvoklikom na ikono grafa v podsistemu *Simulink* diagrama. Uporabnik lahko nastavi tudi časovno os na grafu.

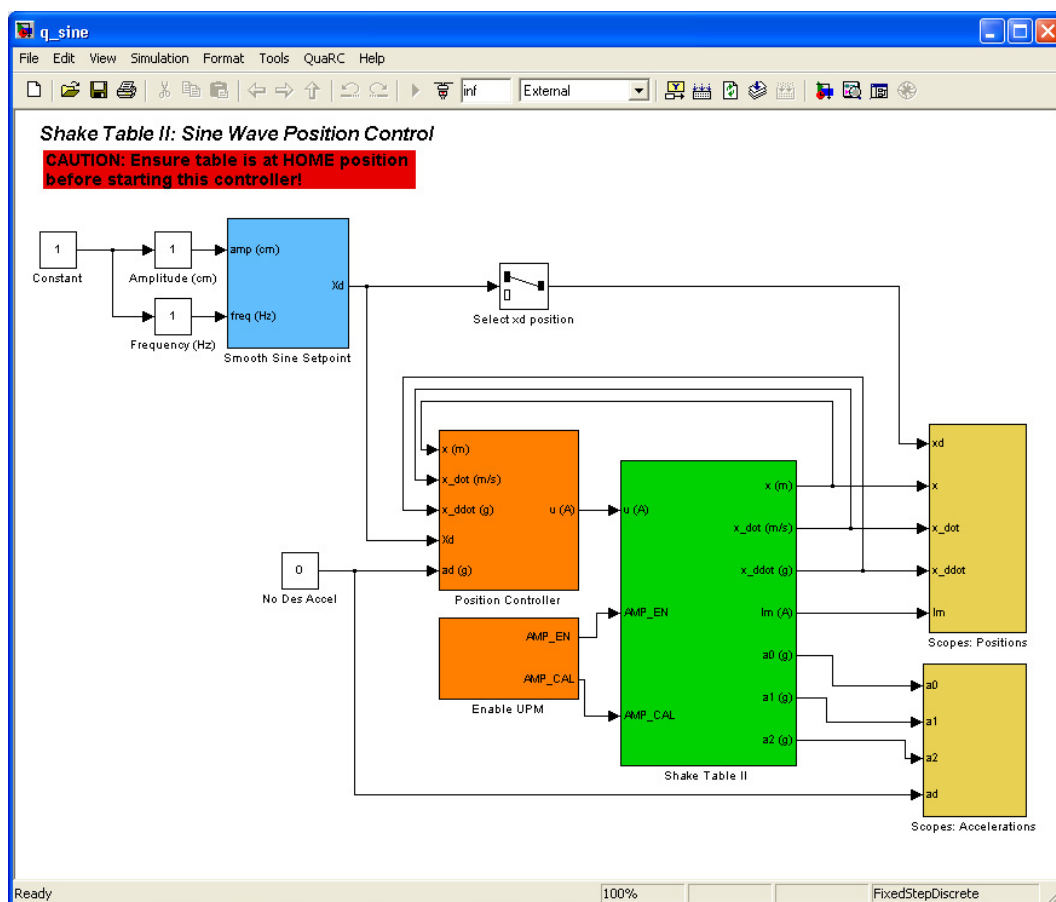
3.3.2.5 Opis *Simulink* diagramov

Simulink diagrami so namenjeni temu, da se iz njih pripravi kontrolerje, ki vodijo strojno opremo, v tem primeru potresno mizo. Oglejmo si, kako so sestavljeni *Simulink* diagrami in kako delujejo kontrolerji.

Simulink diagrami označujejo proces dela in določajo zaporedje operacij kontrolerja. Sestavljeni so iz podsistemov, ki vsebujejo nadaljnje podsisteme in na koncu bloke iz knjižnice *QuaRC Targets Simulink library*. Bloki komunicirajo s strojno opremo in tako kontrolirajo premikanje potresne mize.

Simulink diagrame se lahko poljubno sestavlja, spreminja, dodaja bloke in spreminja povezave med operacijami.

Na razpolago so trije osnovni *Simulink* diagrami za tri načine premikanja potresne mize: sinusno nihanje, sinusno nihanje z naraščajočo frekvenco in prednastavljena pot. Vsi trije imajo podobno zgradbo z manjšimi razlikami glede na različno uporabo. Oglejmo si *Simulink* diagram za potresno mizo *Shake Table II* za primer kontrolerja za sinusno nihanje, ki ga prikazuje spodnja slika.



Slika 22: Simulink diagram kontrolerja za sinusno nihanje

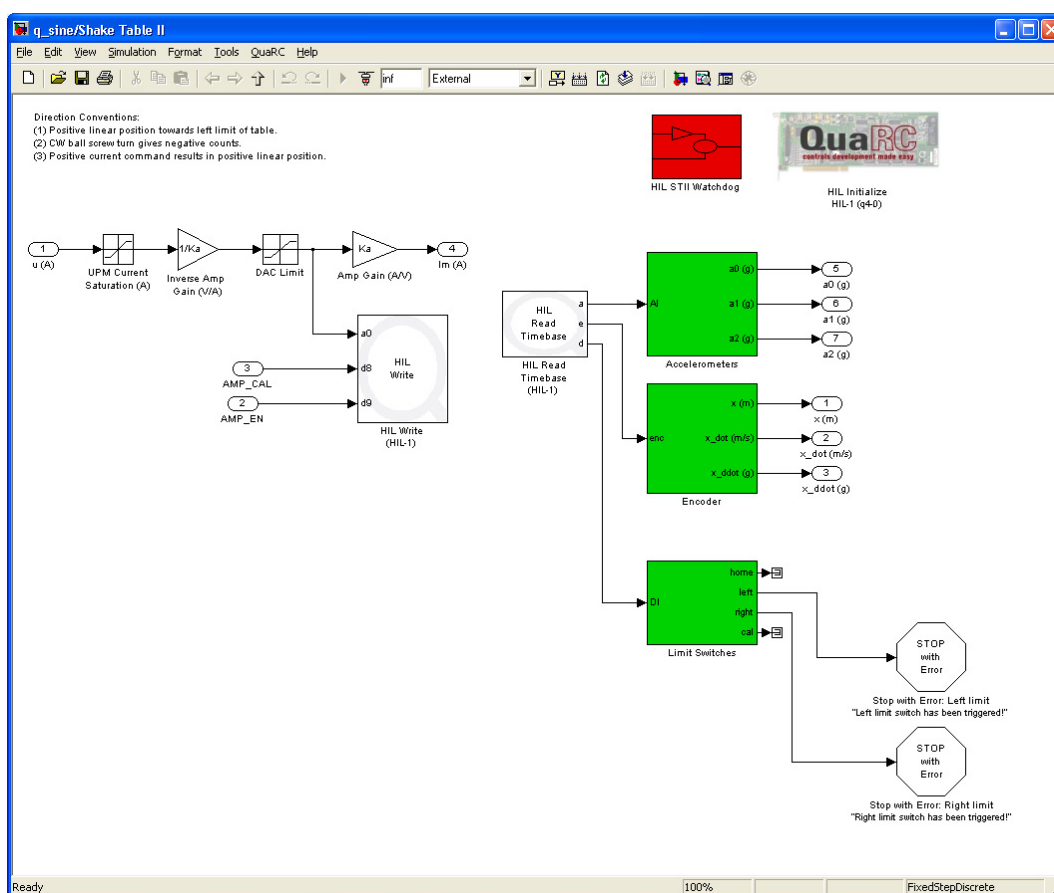
Zgradba *Simulink* diagrama kaže, da se v začetku pripravi vhodne podatke. Za primer sinusnega nihanja sta to vrednosti za amplitudo in frekvenco nihanja. Ti podatki se nato parametrizirajo in pripravijo za gladek začetek dela s potresno mizo v podsistemu, ki ga označuje modri kvadrat *Smooth Sine Setpoint*. Podatki o željeni poti se prenesejo v naslednji podsistem *Position Controller*, kjer se izračuna primeren električni tok za poganjanje potresne mize po željenem nihanju. Ta se prenese v naslednji podsistem *Shake Table II*, kjer električni tok poganja motor, ta pa potresno mizo. Beleži se podatke o poziciji, hitrosti in pospeških potresne mize. Ti podatki se na eni strani izrisujejo na grafih, ki jih definirata podsistema *Scopes: Positions* in *Scopes: Accelerations*, na drugi pa se za kontrolo vračajo nazaj v podsistem *Position Control*.

Sinusno nihanje ne vsebuje informacije o željenih pospeških potresne mize, kar je označeno z okvirčkom *No Des Accel*.

Podsistem *Enable UPM* preveri inicializacijo ojačevalca in kalibracijo potresne mize pred pričetkom eksperimenta.

Zahtevani podatek o premikih potresne mize x_d in pospeških a_d se direktno prenese v podsistem za risanje diagramov. Diagram za prikaz poti in pospeškov potresne mize prikazujeta namreč podatke o željenih in merjenih količinah.

Oglejmo si drevesno strukturo *Simulink* diagramov. Z dvoklikom na podsistem *Shake Table II* lahko vidimo njegovo notranjo zgradbo, ki je prikazana na spodnji sliki.



Slika 23: Podsistem *Shake Table II*

Osnovni podatek, ki se vnese v podsistem je potreben električni tok u (A). Ta se omeji glede na zmogljivosti strojne opreme *UPM Current Saturation* (A) ter *DAC Limit* in pretvori v signal za napetost *Inverse Amp Gain* (V/A), saj kartica za zbiranje podatkov oddaja signal za

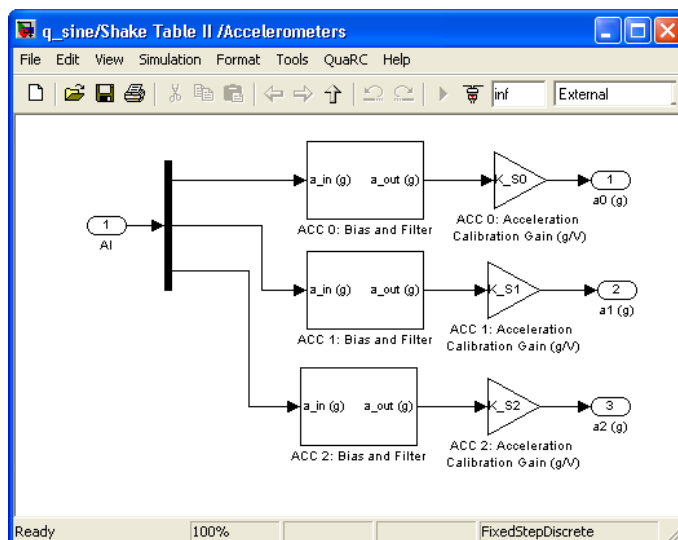
napetost. Poleg podatka o električnem toku se vnese v podsistem še podatka o inicializaciji *AMP_EN* in kalibraciji potresne mize *AMP_CAL*. Vsi trije podatki se vnesejo v *HIL Write* blok, ki pošilja zahtevan električni tok do ojačevalca *UPM-180-25B*, ki poganja *STII* motor. Izhodni podatek, ki ga lahko spremljamo med eksperimentom na grafu je dejanski električni tok potreben za poganjanje mize I_m (A), ki se ga pretvori nazaj iz napetosti *Amp Gain* (A/V).

Na drugi strani blok *HIL Read Timebase* med eksperimenti zbira podatke iz pospeškomerov nameščenih na potresno mizo, dajalnika položaja in mejnih senzorjev potresne mize.

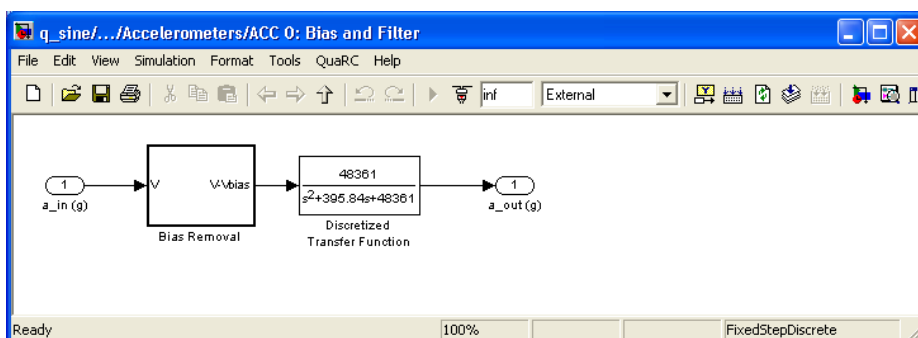
- Podsistem *Accelerometers* prevede vhodni vir *AI*, ki nosi tri signale, v pospeške treh različnih pospeškomerov, če so ti nastavljeni. V osnovi je na spodnjo stran potresne mize pritrjen pospeškomer, medtem, ko se lahko v sistem priključi še dodatne pospeškomere, ki merijo pospeške na obravnavanem modelu konstrukcije.
- V podsistemu *Encoder* se izmerjeni obrati vodilnega vijaka, ki premika zgornjo ploščo, preračunavajo v opravljeno pot x (m). Iz tega podatka je moč izračunati hitrost x_{dot} (m/s) in pospešek x_{ddot} (g) potresne mize.
- Podsistem *Limit Switches* opravlja varnostno funkcijo, saj izklopi ojačevalec v primeru, da potresna miza doseže levi ali desni mejni senzor, torej maksimalni dopustni pomik. Poleg tega zazna tudi pozicijo mize v centralni poziciji in s tem preverja kalibracijo potresne mize.

Blok označen z rdečim kvadratom *HIL STII Watchdog* ustavi kontroler, če ta poteka prepočasi. V bloku *HIL Initialize* se nastavi osnovne karakteristike kartice za zbiranje podatkov.

Če gremo po strukturi *Simulink* diagrama naprej, z dvoklikom na podsistem *Accelerometers* odpremo njegovo notranjo zgradbo, ki je prikazana na sliki 24.

Slika 24: Podsystem *Accelerometers*

Kot rečeno, se iz vira *AI* prebere tri signale za tri pospeškomere. Notranjost podsistema *ACC 0: Bias and Filter* je prikazana na sliki 25. Blok *Bias Removal* izniči vse morebitne neničelne meritve pospeška pred začetkom eksperimenta. Z namenom, da se odstrani neželjene šume iz analognega signala pospeška, gre signal preko filtra, ki ga označuje blok *Discretized Transfer Function*. Blok *ACC: Acceleration Calibration Gain (g/V)* zagotavlja sinhronizacijo pospeškomerov z dajalnikom položaja, kar pomeni, da so pospeški pozitivni v primeru štetja pozitivnih obratov vijaka z dajalnikom položaja.

Slika 25: Podsystem *ACC 0: Bias and Filter*

Na podoben način se lahko pogleda notranjo zgradbo bloka *Bias Removal* in tako naprej. Skupek podsistemov, ki vključujejo nadaljnjo drevesno strukturo, v katero so vgrajeni različni bloki, z definiranimi medsebojnimi povezavami, predstavlja zgradbo *Simulink* diagramov.

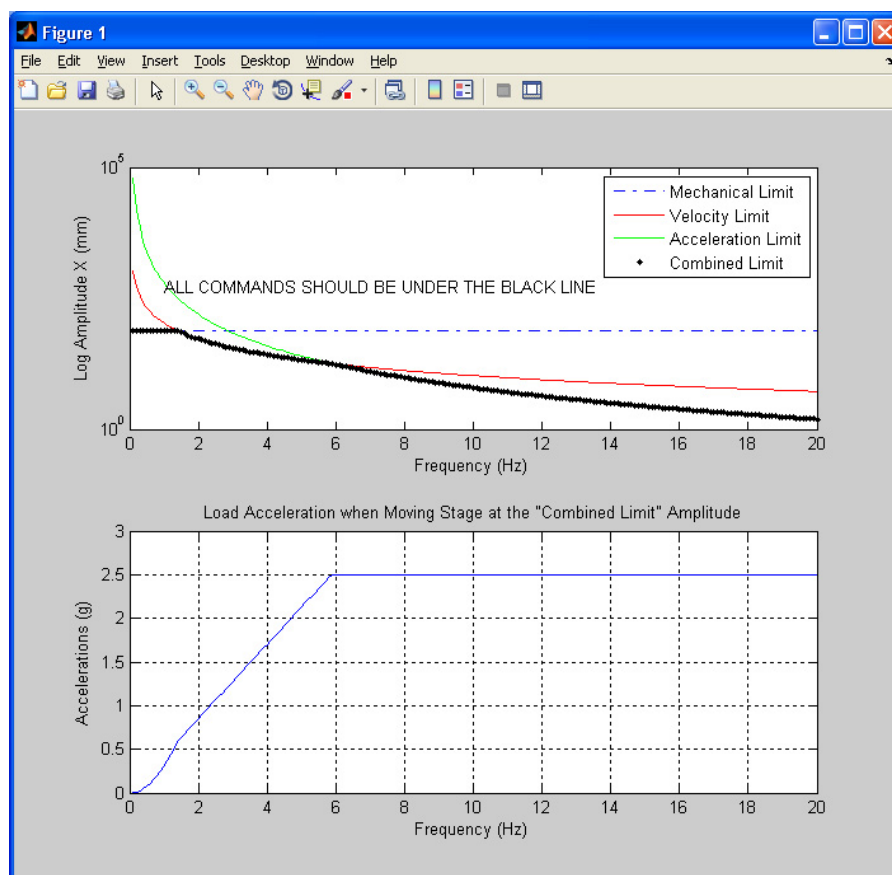
3.3.2.6 Osnovna skripta *setup.m*

Setup.m je glavna skripta, ki jo je potrebno zagnati pred poganjanjem kateregakoli kontrolerja iz *Simulink* diagramov in pred poganjanjem ostalih skript, ki se jih potrebuje za delo s potresno mizo. Skripta *setup.m* naloži parametre za sistem *STII*, izračuna maksimalne dopustne hitrosti in pospeške, nastavi parametre za filtre in tako dalje.

V skripti *setup.m* nastavimo revizijo potresne mize, uporabljene enote, tip ojačevalca in maksimalno izhodno napetost kartice za zbiranje podatkov. Nastavimo lahko maksimalno amplitudo in čas trajanja eksperimenta za primer sinusnega nihanja z naraščajočo frekvenco ter določimo parametre za pravilno delovanje mejnih senzorjev potresne mize.

Zatem, ko vnesemo vse potrebne podatke, poženemo skripto. Vpisati je potrebno maso obtežbe na potresni mizi, t.j. maso modela konstrukcije, nato se izpišejo podatki. K_{ENC} predstavlja vrednost umeritve dajalnika položaja, iz katere se računajo premiki zgornje plošče. Nato se izpiše masa premikajočega se dela potresne mize, dodatna masa na potresni mizi in skupna masa. Na koncu so prikazane maksimalne vrednosti za pomik, hitrost, silo vneseno z motorjem in pospešek, ki predstavljajo kapaciteto mize.

Možno je izrisati diagram s katerim ponazorimo omejitve potresne mize (slika 26). Zgornji diagram na sliki 26 prikazuje maksimalno amplitudo sinusnega nihanja pri različnih frekvencah, ki jo lahko zagotovimo s potresno mizo. Upošteva se omejitve pozicije (modra črta), hitrosti (rdeča črta) in pospeška (zelena črta) potresne mize. Odebeljena črna črta prikazuje kombinirano omejitev za maksimalno amplitudo pri različnih frekvencah. Spodnji diagram na sliki 26 kaže maksimalni pospešek potresne mize v primeru sinusnega nihanja pri različnih frekvencah z amplitudo, ki je definirana s kombinirano omejitvijo prikazano na zgornjem grafu na sliki 26. Te omejitve se spreminjajo z različno količino dodane mase na potresno mizo.



Slika 26: Prikaz maksimalne amplitude sinusnega nihanja in maksimalnih pospeškov pri različnih frekvencah za dodano maso 0 kg

3.4 Uporaba šolskih potresnih miz drugod po svetu

V Združenju univerz za šolske potresne mize (*University Consortium on Instructional Shake Tables - UCIST*) je trenutno več kot 100 univerz. Eden izmed namenov združenja *UCIST* je povezovanje vključenih univerz in sodelovanje pri pripravi eksperimentov za šolske potresne mize. Tako se ustvarja izbor zanimivih in poučnih eksperimentov. Nekaj jih je na kratko predstavljenih v nadaljevanju.

Določanje osnovne frekvence, nihajne oblike in koeficienta dušenja

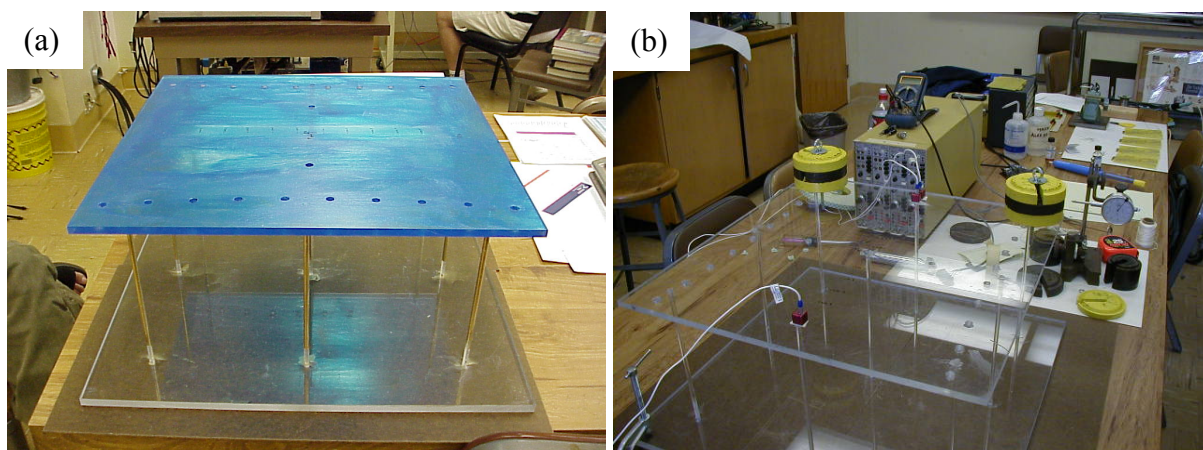
Namen eksperimenta, ki je bil izveden na Univerzi v Washingtonu (Caicedo in sod., 2001), je prikazati osnove dinamike konstrukcij z uporabo šolske potresne mize. Osnovne frekvence in nihajne oblike se za izbran model konstrukcije (slika 27) določi s pomočjo resonance. V prvem poskusu se uporabi sinusno nihanje s časovnim povečevanjem frekvence za določitev frekvenčnega odziva konstrukcije, s čimer se določi osnovne frekvence konstrukcije. Nato se vzbuja konstrukcijo s sinusnim nihanjem pri osnovnih frekvencah za prikaz nihajnih oblik. Na koncu se s pomočjo različnih metod (npr. z uporabo logaritemskega dekrementa) oceni še dušenje v sistemu.



Slika 27: Dvoetažni model

Demonstracija sklopljenega nihanja konstrukcij

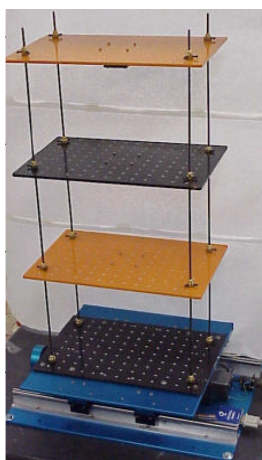
Sočasno transversalno in torzijsko nihanje oz. sklopljeno nihanje konstrukcij zaradi neujemanja centra mase in togosti se predstavi na modelu enoetažne stavbe. Model se skrbno pripravi z namenom prikaza sklopljenega nihanja pri nihajnih oblikah in potresnem odzivu stavbe. Ekscentričnost mase je možno spreminjati, kar je vidno na sliki 28. Izvede se tudi matematični model z namenom analitično eksperimentalnih primerjav. Takšen eksperiment je bil izveden na Univerzi Kalifornije, Los Angeles (Choi in sod., 2002).



Slika 28: (a) Model enoetažne stavbe in (b) ekscentrično postavljena masa

Primerjava eksperimentov z analitičnimi napovedmi

Projekt opisuje pomembne korake za zagon simulacije na potresni mizi in za pripravo odgovarjajočega modela v programu *SAP2000*. Za eksperimente na potresni mizi se izdelata 3D model konstrukcije (slika 29), v programu *SAP2000* pa enostavnejši 2D model. Za umeritev obeh modelov se naredi primerjava analitičnega izračuna togosti etaže konstrukcije in izračunane vrednosti za togost dobljene iz rezultatov programa *SAP2000*. Iz rezultatov eksperimenta se določi koeficient dušenja, ki se ga nato uporabi v programu *SAP2000*. Na koncu se primerja izmerjene maksimalne pospeške v vsaki etaži in maksimalni pomik na vrhu z izračunanimi vrednostmi s programom. Opisani eksperiment izvajajo na Univerzi Oregon (Shonkwiler, 2001).



Slika 29: 3D model na potresni mizi

Dinamični odziv konstrukcij z različno maso in togostjo

Z uporabo šolske potresne mize so na ameriški univerzi *Penn State University* opazovali kako se spreminja dinamični odziv stavbe s spreminjanjem dodane mase in spreminjanjem togosti modela. Primerja se izračunane vrednosti lastnih nihajnih časov in izmerjene vrednosti. Poleg tega se z eksperiment pokaže odvisnost togosti glede na robne pogoje elementov modela konstrukcije ter vpliv natančnost predpostavke za robne pogoje glede na dejansko stanje (Ranf, Dyke, 2001).

Dinamično obnašanje konstrukcije na zemljini

Eksperiment, ki je bil izveden na Univerzi Kalifornije, Davis (Berton in sod., 2004), predstavlja vpliv lokalne geologije in sestave tal na intenzivnost potresnega gibanja tal in vibracij konstrukcije. Pripravi se enostaven model zemljine in model konstrukcije (slika 30), katerima se lahko spreminja osnovno frekvenco s spreminjanjem debeline modela zemljine in spreminjanjem višine modela konstrukcije. Kot prikazano na spodnji sliki se sestavljen model iz zemljine in konstrukcije postavi na potresno mizo, s katero se simulira gibanje tal med potresi. Model konstrukcije se lahko pritrdi togo na potresno mizo ali togo na vrh modela zemljine, ki je togo vpet na potresno mizo. Vsaka komponenta zase se lahko obravnava kot model z eno prostostno stopnjo, skupaj pa kot model z dvema prostostnima stopnjama. Opazuje se odvisnosti med signalom vzbujanja, lastnostmi zemljine in nihanjem konstrukcije. Prikaže se neželjene efekte v primeru ujemanja lastnih frekvenc konstrukcije in zemljine na togi podlagi.



Slika 30: Sestavljen model iz zemljine in konstrukcije

Metoda projektiranja nosilnosti

Z eksperimentom, ki so ga pripravili na Univerzi Illinois se prikaže osnove projektiranja in analize momentnih okvirov. Pripravi se okvire, v katerih se pod vplivom obtežbe ustvarijo plastični členki v nosilcih ali stebrih. Odziv konstrukcije med potresnim delovanjem se predvidi z nelinearno statično analizo. Opazuje se duktilne plastične členke in porušne mehanizme, meri se odziv modela konstrukcije na potresno obtežbo in naredi primerjavo z analitično dobljenimi rezultati. Glede na različno zasnovane modele konstrukcij se ustvarijo različni mehanizmi porušitve, ki nazorno kažejo najprimernejšo zasnovano konstrukcij (Ranf, Dyke, 2001).

Vpliv podajnosti plošč na dinamične lastnosti stavbe

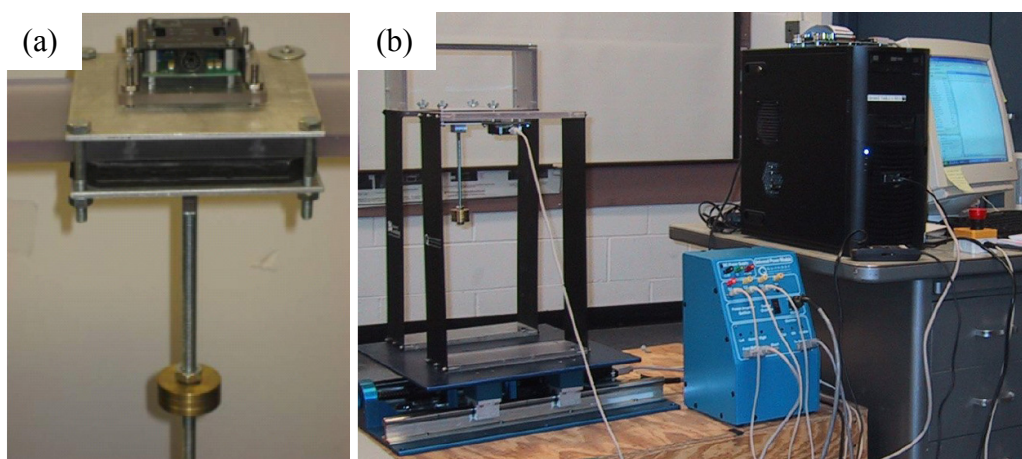
Eksperiment, s katerim je mogoče pokazati vpliv podajnosti plošč izven ravnine plošče na potresni odziv konstrukcije, so zasnovali na Univerzi Nevada, Reno. Pripravi se dva identična, trietažna modela konstrukcij, ki se razlikujeta v debelini plošč. V enem primeru se uporabi debele, v drugem pa relativno tanke vezane plošče, ki predstavljajo togo in podajno etažno diafragmo. Pripravi se tudi računalniški model za vsako od konstrukcij za primerjavo rezultatov (Ranf, Dyke, 2001).

Prikaz likvefakcije

Eksperiment prikazuje vpliv likvefakcije oz. utekočinjenja zemljine na konstrukcije. Na potresno mizo se pritrdi posoda v katero se nasuje pesek kot podlaga na kateri stoji konstrukcija. Pred eksperimentom se v posodo doda vodo, ki med delovanjem potresa utekočini zemljino in konstrukcija na njej postane nestabilna. Eksperiment so zasnovali na univerzi *Southern Illinois, Edwardsville* (Ranf, Dyke, 2001).

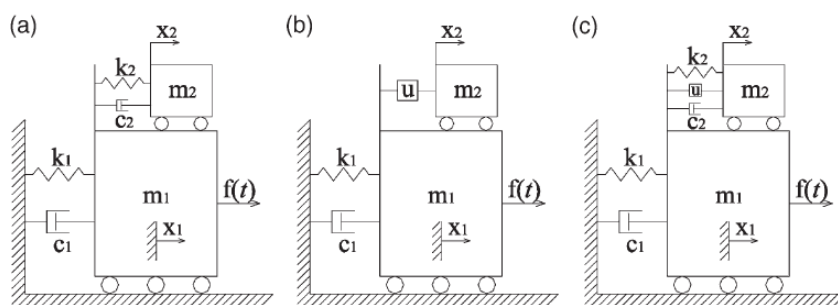
Dušilec vibracij

Različne eksperimente, ki obravnavajo vpliv dušilcev vibracij na odziv konstrukcij so izvedli na Univerzi Kalifornije, San Diego, Univerzi Stanford in Univerzi Florida A&M (Ranf, Dyke, 2001). Pasivne umerjene dušilce vibracij (angl. *tuned mass damper*) se modelira kot nihala, ki se jih nastavi tako, da so v resonanci s konstrukcijo na katero so nameščeni. Ti sistemi, ki so običajno nameščeni na vrhu stavb, so se pokazali kot uporabni za zmanjševanje vibracij zaradi vetra v visokih stavbah, vibracij zaradi uporabe prostorov in za izboljšanje odziva stavb na potresno delovanje. Eksperiment pokaže učinek vibracijskega dušilca pri zmanjševanju vibracij konstrukcije zaradi potresnega gibanja tal. Naredi se primerjavo odziva modela konstrukcije z in brez uporabe dušilca vibracij, kar je prikazano na spodnji sliki.



Slika 31: (a) Pasivni dušilec vibracij in (b) model konstrukcije z in brez dušilca vibracij

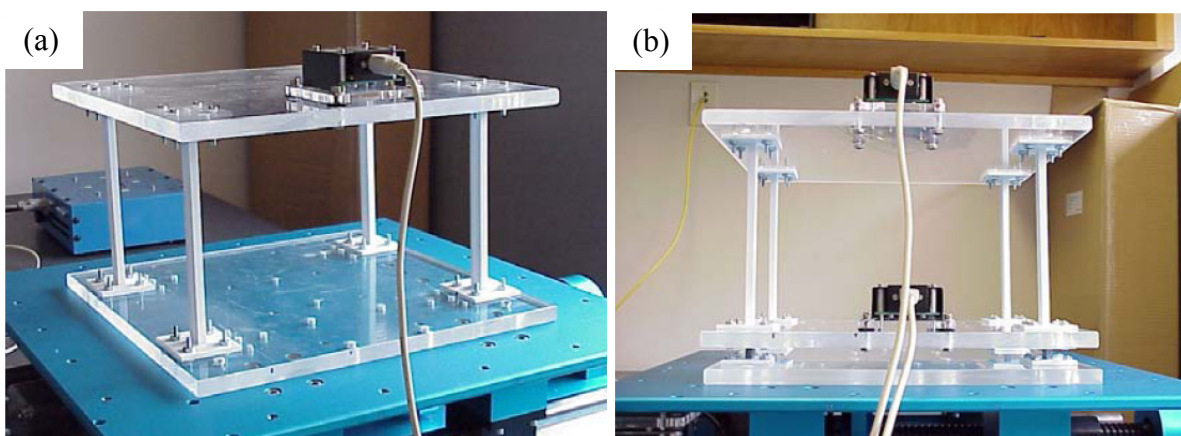
Uporabi se lahko tudi drugačne sisteme za dušenje vibracij. Aktivni dušilec z maso (angl. *active mass damper*) se modelira z vozičkom, ki se linearno premika na vrhu stavbe, ustvarja motnje in duši vibracije stavbe. Voziček se premika v obratni smeri kot stavba med delovanjem potresa. Na sliki 32 je shematski prikaz različnih dušilcev vibracij (Ricciardelli, 2003, str. 1201). Primerja se lahko učinkovitost različnih sistemov za dušenje vibracij, občutljivost posameznega sistema na natančnost ujemanja z lastnim nihanjem konstrukcije, učinkovitost pri harmoničnem nihanju in impulzivnem vzburjanju kot modeliranje vetrne in potresne obtežbe in testira se lahko vpliv različnih postavitvev dušilcev po konstrukciji.



Slika 32: Shematski prikaz konstrukcije z (a) pasivnim umerjenim, (b) aktivnim in (c) aktivnim umerjenim dušilcem

Dinamični odziv potresno izolirane stavbe

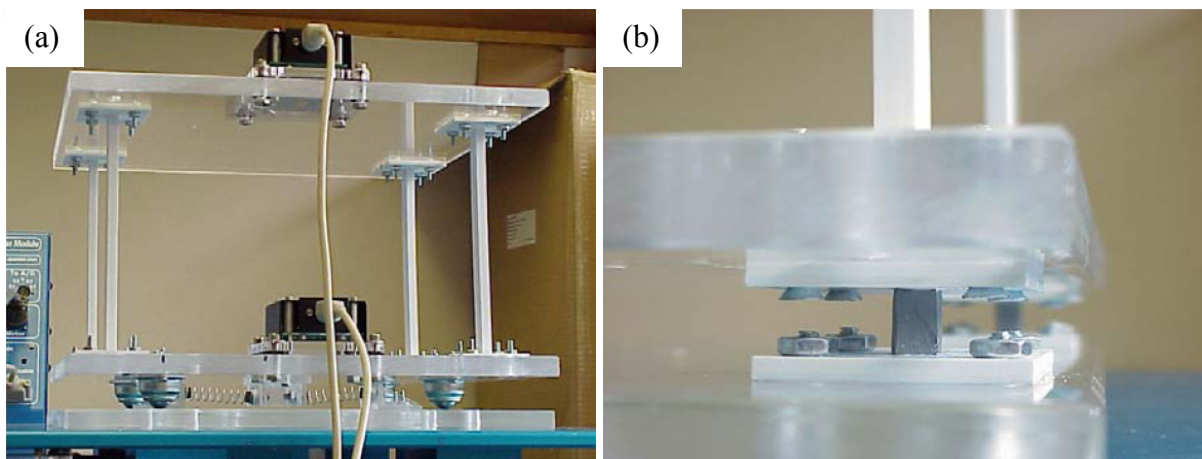
Na univerzi *Washington State University* so na šolski potresni mizi testirali vpliv potresne izolacije (Bennion in sod., 2002). Namen eksperimenta je prikazati odziv potresno izolirane stavbe pod temeljno ploščo, ki je izpostavljena potresni obtežbi. Izdelala se 3D model enoetažne stavbe. Test se izvede za običajno postavitev, ko je model toga pritrjen na potresno mizo, in za primer, ko je model podprt s potresnoodpornim sistemom (slika 33).



Slika 33: (a) Model toga pritrjen na potresno mizo in (b) model s potresno izolacijo

Eksperiment se izvede za dva različna potresnoodporna sistema, ki sta prikazana na sliki 34. Za prvi izolacijski sistem se uporabi trenjske izolatorje. Za omejitev pomikov se spodnjo ploščo modela preko vzmeti pritrdi na temeljno ploščo, ki je pritrjena na potresno mizo. Za

drugi izolacijski sistem se uporabi elastične izolatorje iz gume, ki z deformacijami sipajo energijo in omejujejo pomike konstrukcije nad njimi.



Slika 34: (a) Drseči ležaji in (b) ležaji iz gume

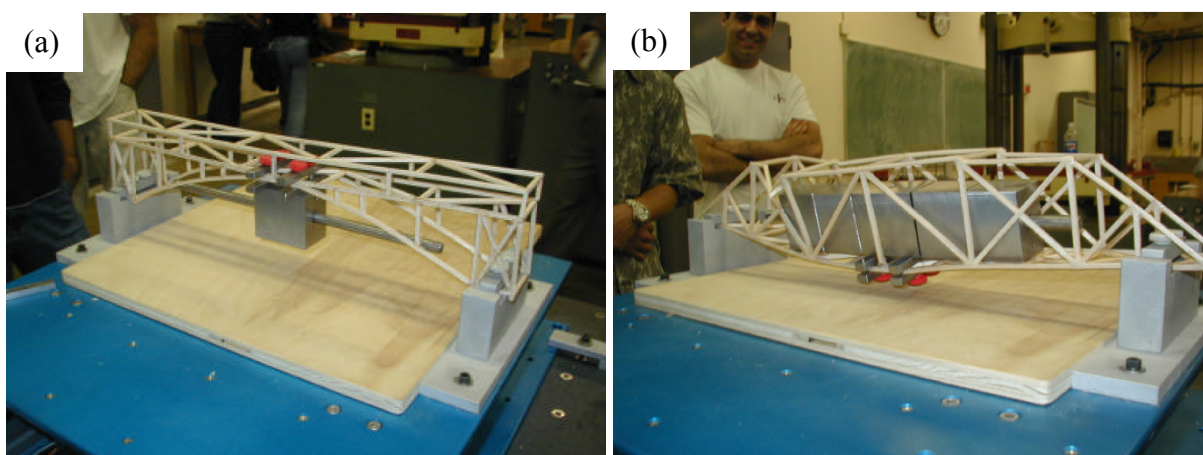
Vpliv potresne izolacije na obnašanje konstrukcije se opazuje pri lastnem in vsiljenem nihanju in pri simulaciji dejanskih potresov. Eksperimentalni rezultati se primerjajo z napovedmi iz numerične analize.

Prenos obtežbe v statično nedoločenih konstrukcijah

Med delovanjem potresne obtežbe pride v armiranobetonskih stebrih pogosto do krhke strižne porušitve zaradi slabe povezave armature v prečni smeri s stremeni. Ko steber po porušitvi ne nosi več obtežbe, ki jo je nosil pred tem, se ta prerazporedi na sosednje nosilne elemente. Dodatne obremenitve lahko vodijo k ustvarjanju porušnega mehanizma in porušitvi konstrukcije. Za model konstrukcije za preizkus na šolski potresni mizi se uporabi okvir s tremi stebri. Srednji steber je neduktilen in se ga lahko modelira s kredo. Po porušitvi srednjega stebra, se osna obremenitev prenese na zunanja, duktilna stebra, ki preprečita porušitev celotne konstrukcije. Eksperiment so izvedli na Univerzi Kalifornije, Berkeley (Ranf, Dyke, 2001).

Tekmovanje v gradnji potresnoodpornih mostov

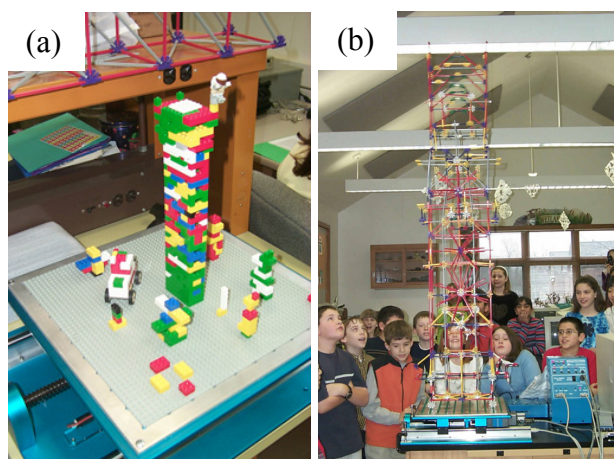
Naredi se majhne palične mostove iz mehkega lesa oz. balze (slika 35). Cilj je doseči čim višjo nosilnost mostu za koristno obtežbo med transverzalnimi gibanjem tal, ki se generira s šolsko potresno mizo. Za zasnovo in gradnjo mostov se uporabi osnove potresnega inženirstva. Zmagovalni most je tisti, ki vzdrži največjo maso pri najmočnejšem potresnem gibanju. Projekt je pripravil McMullin (2005) na univerzi *San Jose State University*.



Slika 35: (a) Model mostu obtežen z dodatno maso in (b) model mostu po poružitvi

Tekmovanje v gradnji potresnovarnih hiš

Na Univerzi Notre Dame (Spencer, 2003) so pripravili projekt za osnovnošolske otroke na temo potresnega inženirstva. Za lažje razumevanje obnašanja nearmiranih zidanih stavb med potresi, se za eksperimente na potresni mizi pripravi modele stavb s kockami *LEGO* (slika 36a). Vsaka ekipa, ki sodeluje, med svoje 4 člane razdeli vloge: lastnik stavbe, ki želi zaslužiti z najvišjo najemnino, arhitekt, ki želi izdelati najlepšo stavbo, gradbenik projektant, ki želi projektirati varno in gradbenik izvajalec, ki mora zgraditi stavbo in ugoditi prejšnjim trem. Površina temeljne plošče je omejena, najemnino se izračuna glede na število etaž, količino uporabnih površin in število oken. Estetski izgled se oceni, varnost gradnje pa se presodi s preizkusom na potresni mizi. Cilj je zgraditi čim lepšo, čim bolj profitno in varno stavbo. V nadaljevanju se lahko naredi konstrukcije iz igračk *K'NEX*, s katerimi se modelira jeklene konstrukcije (slika 36b).



Slika 36: (a) Model zidane stavbe iz kock LEGO in
(b) model jeklene konstrukcije iz igrač *K'NEX*

Demonstracija potresne nevarnosti v hiši zaradi pohištva

Potresnoodporna konstrukcija lahko vzdrži potres brez večjih poškodb, vendar zaradi prevračanja pohištva, obstaja nevarnost za ljudi, ki se med potresom nahajajo v objektu. Za prikaz nekonstrukcijskih nevarnosti med potresom se je pripravil prerezan model hiše, kjer se vidi njena notranjost (slika 37). Demonstracijo so pripravili na Univerzi Nevade, Las Vegas tako, da iz visokih polic padajo težki predmeti, knjižne omare se prevračajo, slike padejo s sten in grelec vode pade na tla. Namen predstavitve je informirati splošno javnost glede nekonstrukcijskih nevarnosti in predlagati nekaj preprostih stvari, ki bodo povečale varnost bivanja ljudi v objektih med potresom (Ranf, Dyke, 2001).



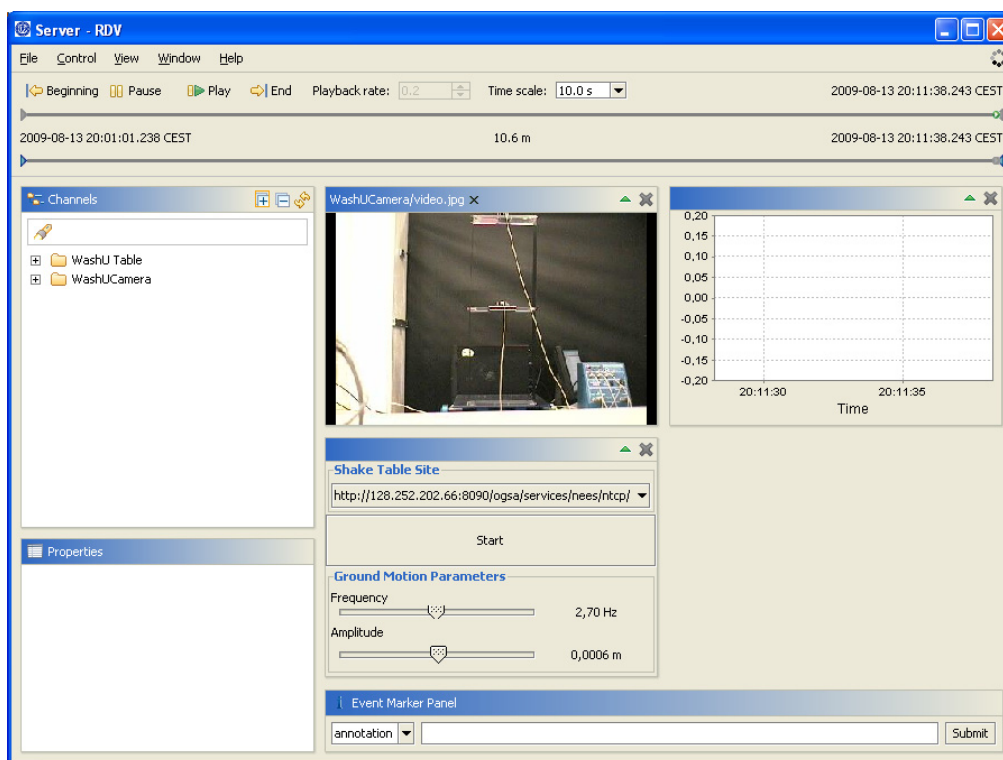
Slika 37: Prerezan model hiše s pohištvom postavljen na šolsko potresno mizo

3.5 Delo s potresnimi mizami na daljavo

V prvem delu delovanja združenja *UCIST* je bil glavni cilj priprava in dokumentiranje čim večjega števila zanimivih eksperimentov za šolske potresne mize. Opravljeni eksperimenti služijo kot pripomoček vsem univerzam članicam *UCIST*, ki imajo šolsko potresno mizo. V naslednjem koraku je cilj združenja *UCIST* razširiti eksperimentalni pristop k poučevanju tudi na univerze, ki nimajo šolske potresne mize.

Z uporabo orodij, ki jih je razvil *NEES (National Network for Earthquake Engineering Simulation)*, je združenje *UCIST* pripravilo programsko opremo za izvajanje dela s potresnimi mizami na daljavo. Možno je tako kontroliranje in vodenje eksperimentov, kot spremljanje dogajanja na potresni mizi v živo, shranjevanje podatkov in posnetkov. Na ta način se lahko izvaja eksperimente na potresnih mizah, ki so locirane drugod, kar omogoča tudi širši nabor eksperimentov.

Povezavo s potresno mizo preko oddaljenega računalnika se vzpostavi preko spletne strani: http://mase.wustl.edu/wusceel/UCIST/MASE431/lab2_page.htm. Poznati je potrebno številko *IP* in številko vrat za željeno lokacijo oz. potresno mizo. Povezava deluje na osnovi strežnika *RBNB (Ring Buffered Network Bus)*, ki prenaša sliko in podatke iz potresne mize uporabniku, ter strežnika *NTCP (NEESGrid Teleoperation Control Protocol)*, ki omogoča uporabniku vodenje in kontrolo potresne mize. Na oddaljenem računalniku mora biti nameščeno okolje *JAVA* za pravilno delovanje programa *RDV (Realtime Data Viewer)*, ki je prikazan na sliki 38.



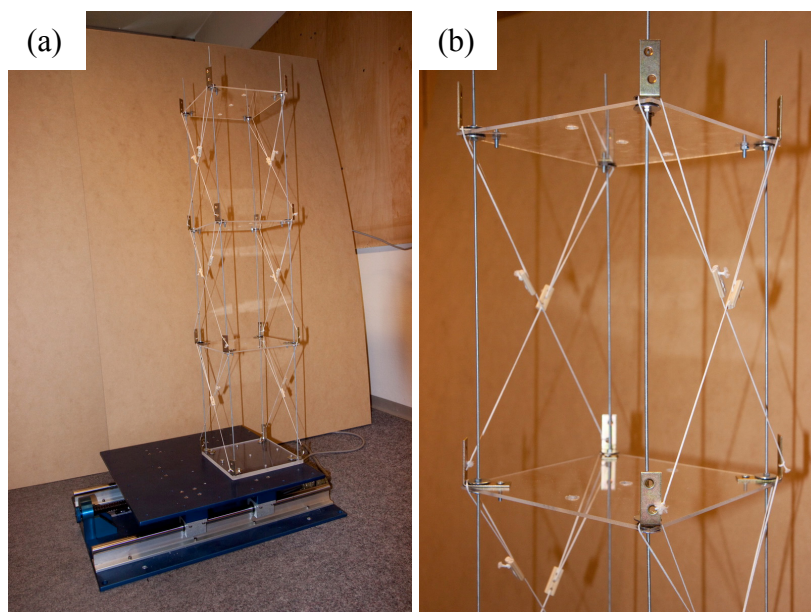
Slika 38: Program za delo na daljavo *RDV*

4 EKSPERIMENTALNI DEL

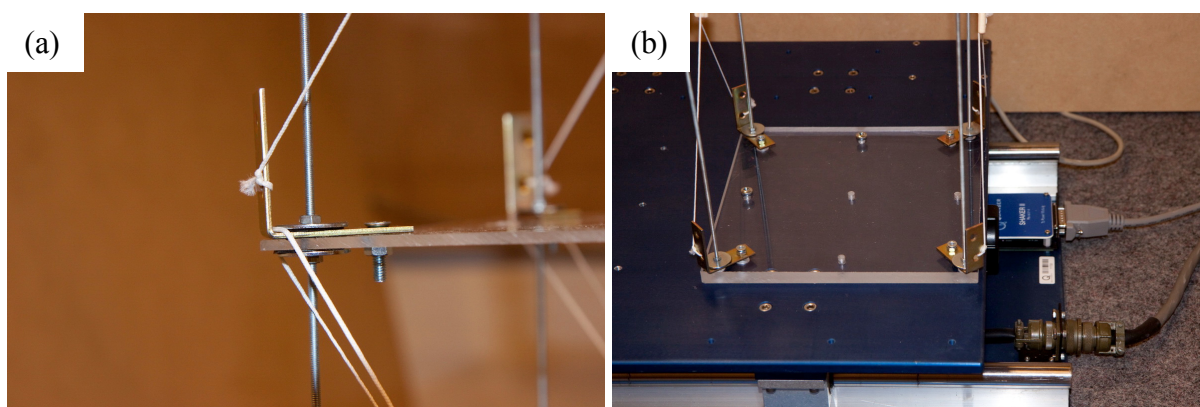
Eksperimente na potresni mizi smo izvedli z namenom, da prikažemo nekatere osnove obnašanja konstrukcij pri dinamični obtežbi. Preizkušance smo obremenjevali s harmonično obtežbo in z različnimi zapisi gibanja tal, ki so bili posneti pri dejanskih potresih. S pojavom resonance smo pokazali nihanje preizkušanca v prvi in drugi obliki, preučevali smo vpliv ekscentričnosti mase na odziv modela in efekt mehke etaže. Poleg tega smo pokazali, da so konstrukcije najbolj ranljive v spodnjih etažah, saj so na teh mestih etažne prečne sile največje. Na koncu smo model obremenjevali tudi z različnimi zapisi gibanja tal. Preizkušanec, ki ga opisujemo v nadaljevanju, namenoma nismo naredili po principih modelne podobnosti, saj smo želeli ustvariti čim bolj podajen model s katerim bi nazorno prikazali pomike pri dinamični obtežbi. Poleg rezultatov eksperimentov, ki jih prikazujemo v nadaljevanju, so posnetki eksperimentov zbrani na priloženi zgoščenki.

4.1 Opis preizkušanca

Preizkušanec, ki smo ga sestavili za izvajanje eksperimentov na šolski potresni mizi, je simbolni model enostavne trietažne stavbe (slika 39). Sestavljen je iz plošč iz pleksi stekla in kovinskih palic, ki modelirajo stebre. Kovinske palice oz. stebri so razporejeni v štiri vogale plošč in imajo po celotni dolžini vrezan navoj, ki služi za navijanje matic s katerimi se pritrdi plošče. Vsak stik plošče s kovinsko palico je utrjen s podložko in gumijasto podlogo nad in pod ploščo, za boljše obnašanje stika med dinamičnim obremenjevanjem med eksperimenti, kar je prikazano na sliki 40a. V vogalih plošč so pritrjeni nosilci, ki se jih uporabi za montažo diagonal. Te so narejene iz tanke vrvice, debeline 1 mm, in so pripravljene tako, da se jih po potrebi napenja. V ploščah so izvrtane luknje za pritrditev dodatnih mas. Spodnja plošča preizkušanca je debelejša zaradi zagotavljanja vpetosti stebrov in povezave s potresno mizo, na katero je preizkušanec tego vpet (slika 40b).



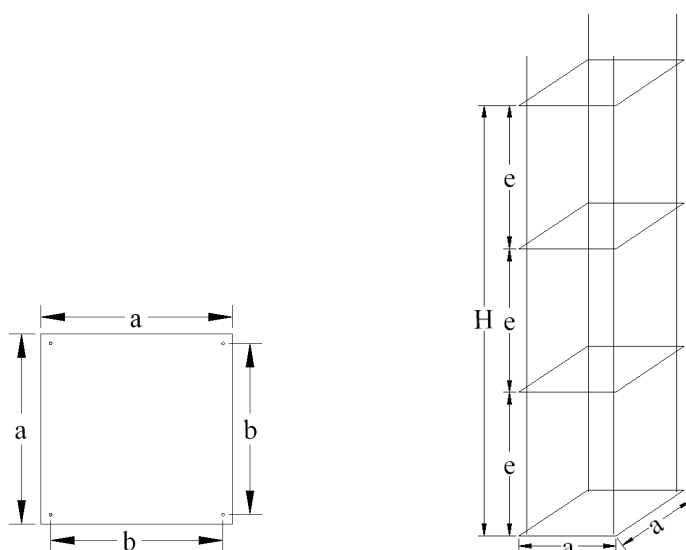
Slika 39: (a) Preizkušavec na šolski potresni mizi in (b) pogled od blizu na model konstrukcije



Slika 40: (a) Značilen spoj in (b) pritrditev preizkušanca na potresno mizo

4.1.1 Dimenzije preizkušanca

Geometrija preizkušanca ni zasnovana tako, da bi simulirala dejansko stavbo, saj bi bile v takšnem primeru deformacije na preizkušancu minimalne. Zato je geometrija preizkušanca takšna, da omogoča velike deformacije pri eksperimentih. Višina preizkušanca znaša 90 cm, tloris je kvadraten z dolžino stranice 20 cm. Ostale dimenzije so prikazane v preglednici 6 in na sliki 41.



Slika 41: Tlorisni pogled na ploščo preizkušanca in 3D pogled na preizkušanec

Preglednica 6: Dimenzije elementov preizkušanca

Opis	Oznaka	Vrednost	Enota
Dolžina plošče	a	20	cm
Razdalja med palicami	b	18	cm
Debelina spodnje plošče	t_1	1	cm
Debelina ostalih plošč	t_2	0.3	cm
Etažna višina	e	30	cm
Višina modela	H	90	cm
Premer palic	D	0.3	cm

4.1.2 Masa preizkušanca in dodatne obtežitve

Preizkušanec smo razvili, glede na omejene kapacitete potresne mize, tako, da bi bila njegova masa čim manjša. Po drugi strani smo takšen preizkušanec razvili z namenom, da bi imeli čim večjo možnost pritrjevanja dodatnih mas na preizkušanec. Masa preizkušanca je podana v preglednici 7, uporabljen sistem dodatne obtežitve pa je opisan v nadaljevanju.

Preglednica 7: Mase elementov preizkušanca

Opis	Oznaka	Vrednost	Enota
Masa spodnje plošče	m_{sp}	0.5	kg
Masa ostalih plošč	m_p	0.15	kg
Masa palice	m_{pal}	0.06	kg
Masa spoja	m_s	0.04	kg

Masa spoja iz preglednice 7 predstavlja skupno maso elementov, ki so v vsakem spoju: kotnik, matice, podložki in vijak. Maso diagonal smo zanemarili.

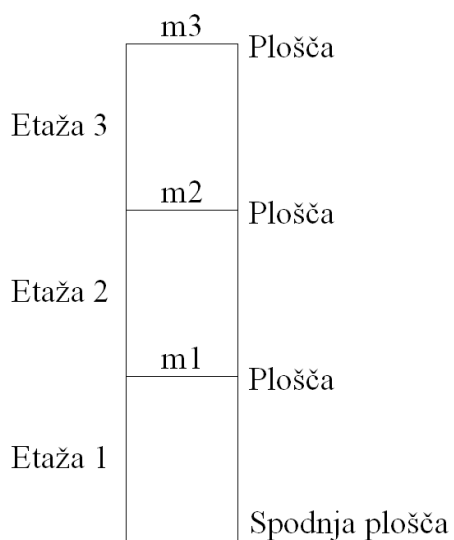
Izračun etažnih mas, ki so prikazane na sliki 42:

$$m_1 = m_p + \frac{4}{3} m_{pal} + 4m_s = 0,39kg$$

$$m_2 = m_p + \frac{4}{3} m_{pal} + 4m_s = 0,39kg$$

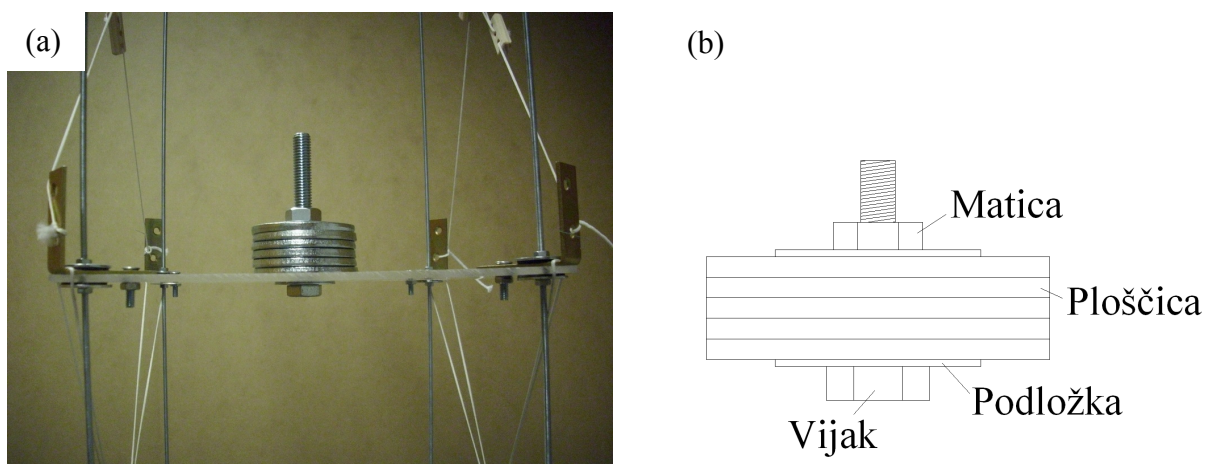
$$m_3 = m_p + \frac{4}{6} m_{pal} + 4m_s = 0,35kg$$

$$m = m_1 + m_2 + m_3 = 1,13kg$$



Slika 42: Etažne mase

Za dodatno obtežitev preizkušanca smo uporabili sistem, ki je prikazan na spodnji sliki. Mase posameznih elementov, ki se jih uporabi za dodatno obtežitev, so zbrane v preglednici 8.



Slika 43: (a) Dodatna obtežitev preizkušanca in (b) shematski prikaz dodatne obtežitve

Preglednica 8: Masa dodatne obtežitve

Opis	Oznaka	Vrednost	Enota
Masa matice	m_m	0.02	kg
Masa vijaka	m_v	0.05	kg
Masa ploščice	m_{plo}	0.07	kg

Maso podložk za pritrnitev ploščic smo zanemarili. Glede na željeno dodatno obtežitev, uporabimo poljubno število ploščic. Predstavljeni sistem dodatne obtežitve lahko pričvrstimo na različnih mestih, kjer je v ploščah izvrtana luknja.

4.1.3 Podajnostna in togostna matrika preizkušanca

Za analitično določitev nihajnega časa in nihajnih oblik preizkušanca potrebujemo podatke o njegovi togostni matriki. Glede na to, da lažje določimo koeficiente podajnostne matrike, najprej določimo podajnostno matriko, iz katere nato izračunamo togostno matriko.

Koeficienti d_{ij} podajnostne matrike $[D]$ predstavljajo pomik točke i zaradi enotske sile v točki j . Koeficiente podajnostne matrike smo določili eksperimentalno po definiciji. Preizkušanec smo posamično v vseh treh prostostnih stopnjah obremenili s silo in pri tem merili pomike na mestu delovanja sile in na mestu drugih dveh prostostnih stopenj. Za kontroliran vnos sile smo uporabili silomer, ki je prikazan na sliki 44. S količnikom izmerjenih pomikov in znane sile smo določili naslednje vrednostni podajnostne matrike

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0035 & 0,0041 & 0,0042 \\ 0,0041 & 0,0085 & 0,0093 \\ 0,0042 & 0,0093 & 0,0137 \end{bmatrix} \frac{m}{N}.$$

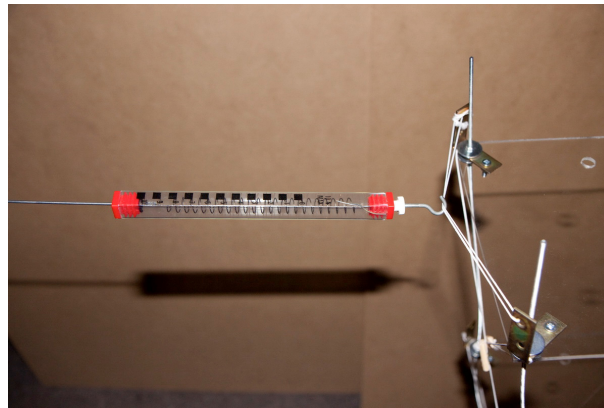
Togostna matrika $[K]$ je definirana kot inverzna matrika podajnostne matrike

$$[K] = inv([D]), \quad (13)$$

zato jo lahko sedaj izvednotimo

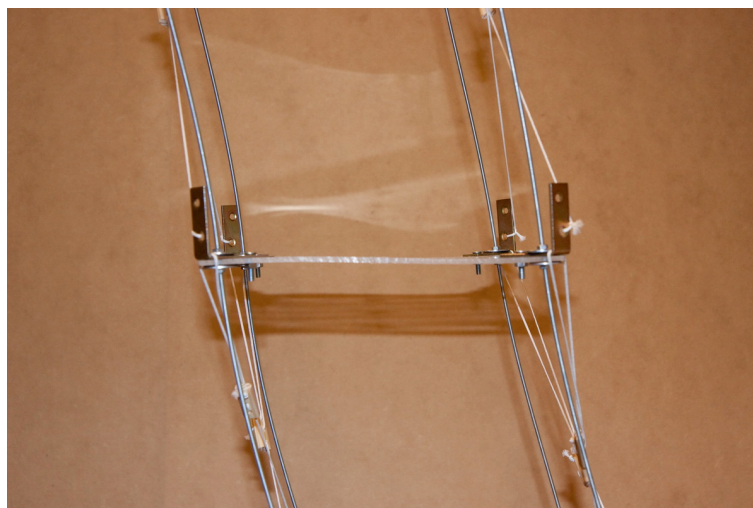
$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 667.04 & -380.94 & 54.102 \\ -380.94 & 674.83 & -341.31 \\ 54.102 & -341.31 & 288.10 \end{bmatrix} \frac{N}{m},$$

kjer so k_{ij} koeficienti togostne matrike in predstavljajo silo na mestu i zaradi enotskega pomika na mestu j .



Slika 44: Kontrola vnesene sile s silomerom

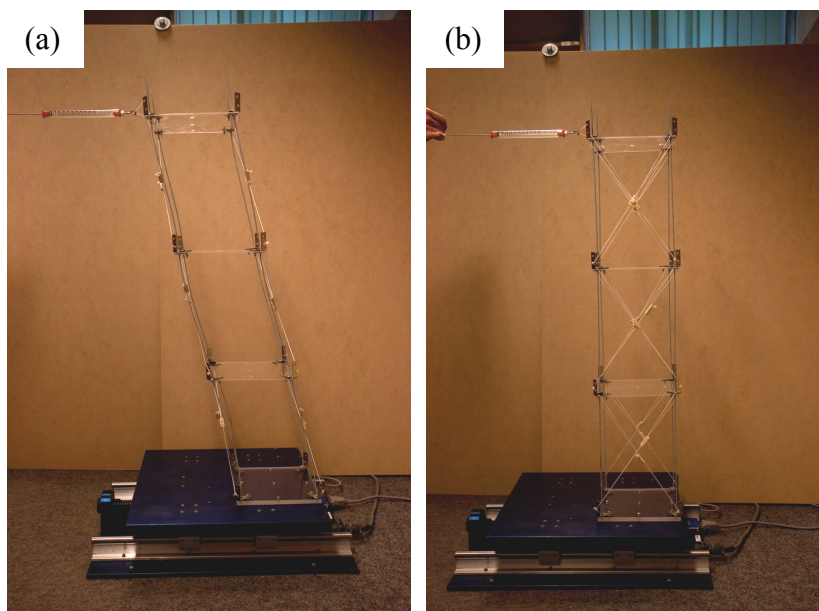
Podajnostno matriko smo določili eksperimentalno saj analitična določitev togostne matrike obravnavanega preizkušanca ni trivialna. Slika 45 prikazuje deformacijsko obliko preizkušanca, kjer je jasno vidno ukrivljanje kovinskih palic s katerimi modeliramo stebre konstrukcije. Kljub temu, da smo želeli zagotoviti polno vpetje v spojih, stebri v deformacijski obliki s ploščami ne tvorijo pravega kota, kar predstavlja delno vpetost v spojih.



Slika 45: Spoji zagotavljajo delno vpetost stebrov

Model konstrukcije je narejen kot relativno podajen z namenom omogočanja dovolj velikih deformacij pri simuliranju potresne obtežbe za prikaz določenih dinamičnih pojavov. Glede na to, da ima potresna miza eno prostostno stopnjo, pričakujemo pri vzbujanju simetričnega preizkušanca translatorno gibanje. Kljub temu pride zaradi velike podajnosti preizkušanca in manjših geometrijskih nepravilnosti pri vzbujanju s potresno mizo v eni smeri do sklopljenega nihanja. Zaradi tega smo v smeri, ki je pravokotna na smer vzbujanja, na preizkušane pritrdili diagonale. S tem smo povečali togost preizkušanca v smeri pravokotno na smer vzbujanja in tako zagotovili translatorno nihanje konstrukcije.

S prednapetimi diagonalami se togost konstrukcije povsem spremeni. Togost konstrukcije v smeri diagonal se poveča, medtem ko se togost v pravokotni smeri ne spremeni. Izmerjen maksimalni pomik pri sili 10 N na vrhu modela v primeru brez diagonal je 13.7 cm. V primeru delovanja enake sile na vrhu modela v drugi smeri, kjer delujejo diagonale, se maksimalni pomik zmanjša na 2.1 cm. Delovanje diagonal je nazorno prikazano na spodnjih slikah.



Slika 46: Pomik pri sili 10N (a) brez in (b) s prednapetimi diagonalami

4.2 Prikaz lastnih frekvenc in nihajnih oblik

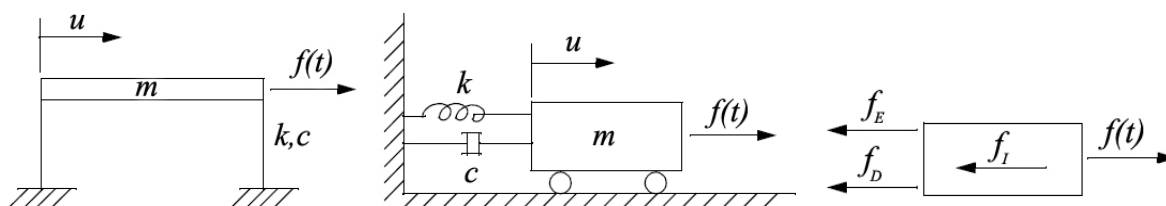
4.2.1 Enačba gibanja in posplošen problem lastnih vrednosti

Konstrukcije z eno prostostno stopnjo lahko modeliramo kot enostaven dinamično ekvivalenten model, prikazan na sliki 47. V tem modelu je togost stebrov modelirana z vzmetjo k , dušenje z dušilko c in etažna masa z maso m . Na model konstrukcije delujejo v tem primeru notranja sila f_E , sila dušenja f_D , zunanja obtežba $f(t)$ in inercialna sila f_I . Te sile so definirane z izrazi

$$f_E = k \cdot u, \quad (14)$$

$$f_D = c \cdot \dot{u} \text{ in} \quad (15)$$

$$f_I = m \cdot \ddot{u}. \quad (16)$$



Slika 47: Model konstrukcije z eno prostostno stopnjo

Oznaka u predstavlja pomik, \dot{u} prvi odvod pomika po času – hitrost, \ddot{u} drugi odvod pomika po času – pospešek, k togost vzmeti oz. vzmetno konstanto, c koeficient dušenja in m etažna masa.

Če seštejemo vse sile, ki delujejo na model, dobimo

$$\Sigma F = m\ddot{u} = f(t) - c\dot{u} - ku \quad (17)$$

in po preureditvi

$$\boxed{m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t)}. \quad (18)$$

Dobili smo enačbo gibanja (nihanja) za viskozno dušen linearen sistem z eno prostostno stopnjo. Enačba (18) predstavlja nehomogeno linearno diferencialno enačbo 2. reda s

konstantnimi koeficienti. V posebnih primerih se ta enačba poenostavi, če na primer upoštevamo

$$\begin{aligned} f(t) = 0 & \quad \text{lastno nihanje,} \\ c = 0 & \quad \text{nedušeno nihanje ali} \\ \dot{u} = \ddot{u} = 0 & \quad \text{statika.} \end{aligned}$$

Ker je obravnavan preizkušane model z več prostostnimi stopnjami, zapis enačbe (18) spremenimo v sistem enačb. Sistem enačb gibanja za konstrukcije z več prostostnimi stopnjami je povsem analogen enačbi (18), le da so skalarne količine nadomeščene z matrikami in vektorji

$$\boxed{[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}}, \quad (19)$$

kjer je [M] masna matrika, [C] matrika dušenja in [K] togostna matrika. Natančna izpeljava enačbe gibanja sistema z več prostostnimi stopnjami je podana v različnih učbenikih (npr. Fajfar, 1984).

Osnovna lastnost konstrukcije, kadar govorimo o dinamiki konstrukcij, so lastni nihajni časi in nihajne oblike konstrukcije. Majhno dušenje, ki je značilno za gradbene konstrukcije, na te karakteristike zelo malo vpliva in zato ne naredimo velike napake, če dušenje pri določanju lastnih frekvenc in nihajnih oblik zanemarimo.

Enačbo nedušene lastnega nihanja dobimo, če upoštevamo, da so sile dušenja in zunanja obtežba enake nič

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0. \quad (20)$$

Rešitev enačbe (20) je

$$\{U\} = \{\Phi\} \sin(\omega t - \Theta), \quad (21)$$

kjer predstavlja $\{\Phi\}$ deformacijsko obliko sistema, ω krožno frekvenco in Θ fazni zamik.

Če rešitev sistema dvakrat odvajamo in vstavimo v enačbo (20), dobimo

$$-\omega^2 [M]\{\Phi\} \sin(\omega t - \Theta) + [K]\{\Phi\} \sin(\omega t - \Theta) = \{0\}. \quad (22)$$

Ker je sinus v splošnem različen od nič, dobimo

$$\boxed{([K] - \omega^2[M])\{\Phi\} = \{0\}.} \quad (23)$$

Enačba (23) se v matematiki imenuje posplošen problem lastnih vrednosti. Vrednosti ω^2 se imenujejo lastne vrednosti, vektorji $\{\Phi\}$ pa lastni vektorji. Enačba (23) predstavlja sistem homogenih algebraičnih enačb, $[K]$ togostno matriko, $[M]$ masno matriko, ω lastno frekvenco in $\{\Phi\}$ lastno nihajno obliko.

Rešitev posplošenega problema lastnih vrednosti ima netrivialno rešitev le, če je determinanta

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0. \quad (24)$$

Tako za konstrukcijo z n prostostnimi stopnjami rešitev posplošenega problema lastnih vrednosti predstavlja n lastnih frekvenc $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ in n lastnih nihajnih oblik $\{\Phi_1\}, \{\Phi_2\}, \dots, \{\Phi_n\}$. Za izračun lastnih nihajnih časov T velja zveza

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (25)$$

Ugotovili smo, da sistem z več prostostnimi stopnjami lahko niha na toliko različnih načinov, kolikor ima prostostnih stopenj. Vsak od teh načinov ima svojo frekvenco (lastna frekvenca) in svojo obliko (nihajna oblika).

V splošnem konstrukcije nihajo z neko kombinacijo vseh lastnih načinov. V tem primeru gibanje posameznih mas ni opisano z enostavno sinusno funkcijo in ne obstaja ena sama frekvenca gibanja. Oblika deformacijske linije se pri takem nihanju spreminja s časom.

Če pa vzbudimo le en način lastnega nihanja konstrukcije, je nihanje vsake od mas opisano z enostavno harmonično funkcijo. Tako nihanje lahko vzbudimo s potresno mizo tako, da potresna miza sledi sinusnemu nihanju z enako frekvenco kot je lastna frekvenca modela konstrukcije. Nihajna oblika se med nihanjem ne spreminja, frekvenca nihanja vseh mas pa je enaka lastni frekvenci, ki ustreza vzbujenemu načinu nihanja.

4.2.2 Izračun nihajnih časov in nihajnih oblik

Z reševanjem enačbe (23) izračunamo vrednosti za nihajne čase in nihajne oblike za primer osnovnega preizkušanca in preizkušanca obteženega z dodatno maso 0.5 kg v prvi in tretji etaži. Obravnavana modela konstrukcij sta označena na sliki 48 z zaporedno številko 1 in 6.

Vhodne podatke predstavljata togostna matrika $[K]$ in masna matrika $[M]$. Koeficiente za omenjeni matriki smo pripravili v zgornjih poglavjih, zato lahko zapišemo

$$[K] = \begin{bmatrix} 667.04 & -380.94 & 54.102 \\ -380.94 & 674.83 & -341.31 \\ 54.102 & -341.31 & 288.10 \end{bmatrix} \frac{N}{m} \text{ in } [M] = \begin{bmatrix} 0.39+0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0.39 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35+0.50 \end{bmatrix} kg,$$

kjer togostna matrika velja za vse preizkušance prikazane na sliki 48, masna matrika pa se spreminja glede na uporabljeno dodatno maso. V primeru osnovne konstrukcije (1 na sliki 48) velja masna matrika z upoštevanjem etažnih mas, za drugi model konstrukcije (6 na sliki 48) pa etažnim masam prištejemo še uporabljeno dodatno maso.

Izračun izvedemo kot je opisano zgoraj, rezultate pa prikazujemo v preglednici 9. Za preizkušane s tremi prostostnimi stopnjami zapišemo vse 3 nihajne čase in pripadajoče nihajne oblike.

Preglednica 9: Izračunani nihajni časi in pripadajoče nihajne oblike

Model konstrukcije 1 (slika 48)				Model konstrukcije 6 (slika 48)			
	1.	2.	3.		1.	2.	3.
Nihajni čas [s]	0.57	0.18	0.12	Nihajni čas [s]	0.79	0.27	0.13
Nihajna oblika	0.3936	1.0000	0.8238	Nihajna oblika	0.3767	1.0000	0.3004
	0.7826	0.4450	-1.0000		0.7458	0.4227	-1.0000
	1.0000	-0.8267	0.5107		1.0000	-0.5391	0.2237

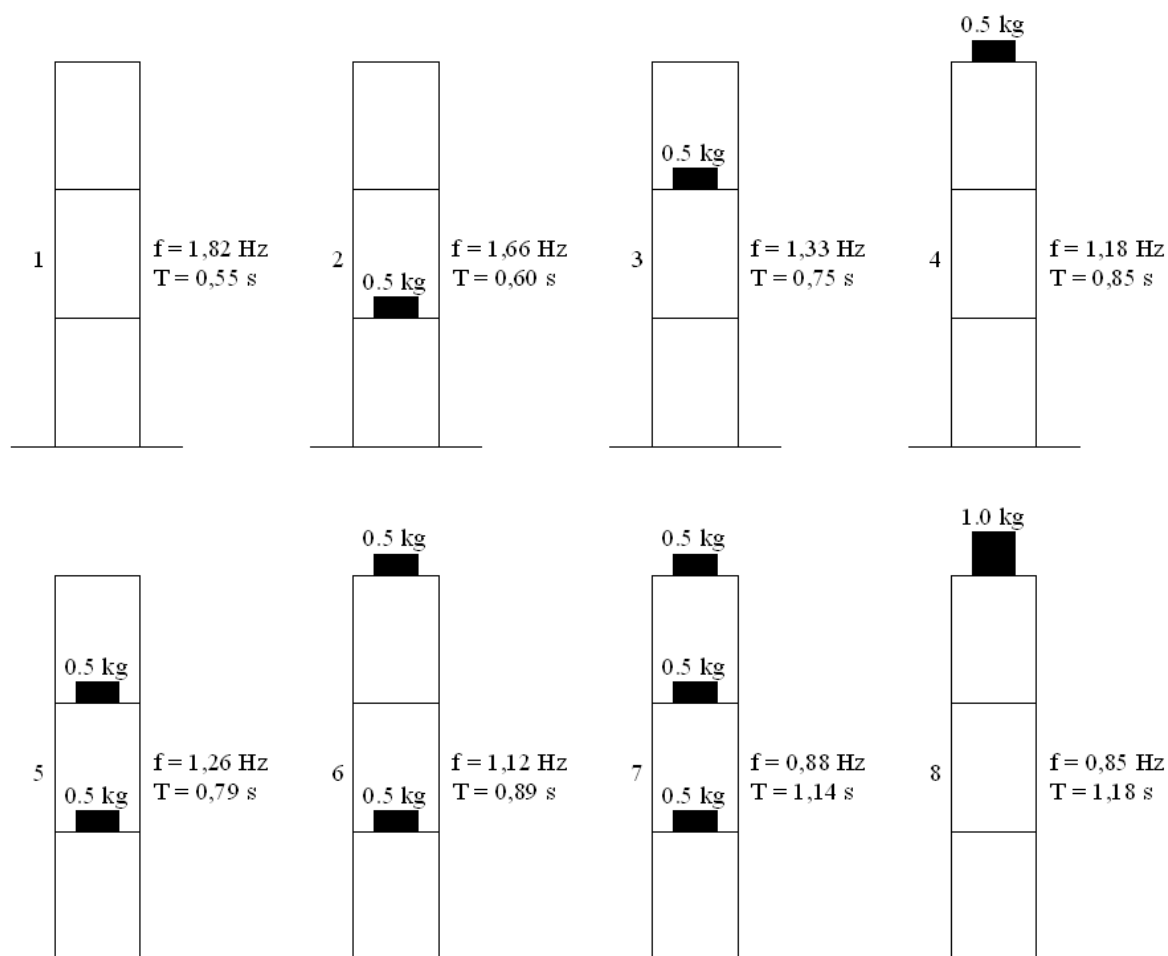
4.2.3 Prikaz prvih lastnih frekvenc za različne konstrukcije

Posnetki na zgoščenci: Prva lastna frekvenca 1–8.wmv

Z eksperimentom prikažemo prve lastne frekvence za različne konstrukcije, ki jih modeliramo z istim preizkušancem na katerega na različna mesta pritrdimo dodatne mase. Vsak eksperiment izvedemo na potresni mizi, ki se v začetku premika z majhno frekvenco in jo postopoma povečujemo. Ko se frekvenca vzbujanja in lastna frekvenca preizkušanca ujemata, pride do velikih amplitud nihanja, kar označujemo s pojmom resonanca. Ta pojav je dobro viden in tako je določitev lastnih frekvenc preizkušanca razmeroma enostavna. Prikazujemo le prvo od treh lastnih frekvenc preizkušanca, ki ima tri prostostne stopnje, saj sta ostali lastni frekvenci v večini primerov precej višji in težko prepoznavni. Na sliki 48 je za vsak model konstrukcije zapisana pripadajoča lastna frekvenca f in lastni nihajni čas T , med katerima velja zveza

$$T = \frac{1}{f}. \quad (26)$$

Na sliki 48 je jasno razvidno, da nihajni čas narašča z višino konstrukcije in količino pritrjenih dodatnih mas. Za obravnavane primere se nihajni časi gibljejo med 0.55 s in 1.18 s. Analitični izračun prvega nihajnega časa za primer konstrukcije 1 (slika 48) se zelo dobro ujema z eksperimentalno dobljenim rezultatom. V primeru konstrukcije 6 (slika 48) se izračunana vrednost osnovnega nihajnega časa razlikuje od izmerjenega za 0.1 s, kar predstavlja 10 % odstopanje. Do tega pride zaradi ne povsem natančnega določanja podajnostnih koeficientov konstrukcije.



Slika 48: Prve lastne frekvence in prvi lastni nihajni časi za različne konstrukcije

4.2.4 Prikaz prve in druge nihajne oblike

Posnetek na zgoščenki: 1. in 2. nihajna oblika.wmv

Konstrukcije imajo toliko nihajnih oblik kot imajo prostostnih stopenj. Nihajna oblika pri najnižji lastni frekvenci je prva nihajna oblika, pri drugi lastni frekvenci je druga in tako naprej.

Za preizkušane, ki je prikazan na sliki 49a, smo eksperimentalno prikazali prvo in drugo nihajno obliko. Sama zasnova preizkušance je takšna, da smo ga glede na omejitve potresne mize še vedno lahko vzbudili tako, da je nihal tudi v drugi nihajni obliki. Za dodatno obtežbo

smo uporabili 0.5 kg utež nad prvo in tretjo etažo. S pomočjo pojava resonance smo določili, da je prvi nihajni čas 0.89 s, drugi pa 0.28 s. Pripadajoče nihajne oblike so prikazane na sliki 49. Analitični rezultati, prikazani v preglednici 9, za enako konstrukcijo kot je obravnavana v tem poglavju, se zelo dobro ujemajo za primer 2. nihajne oblike.

1. nihajna oblika

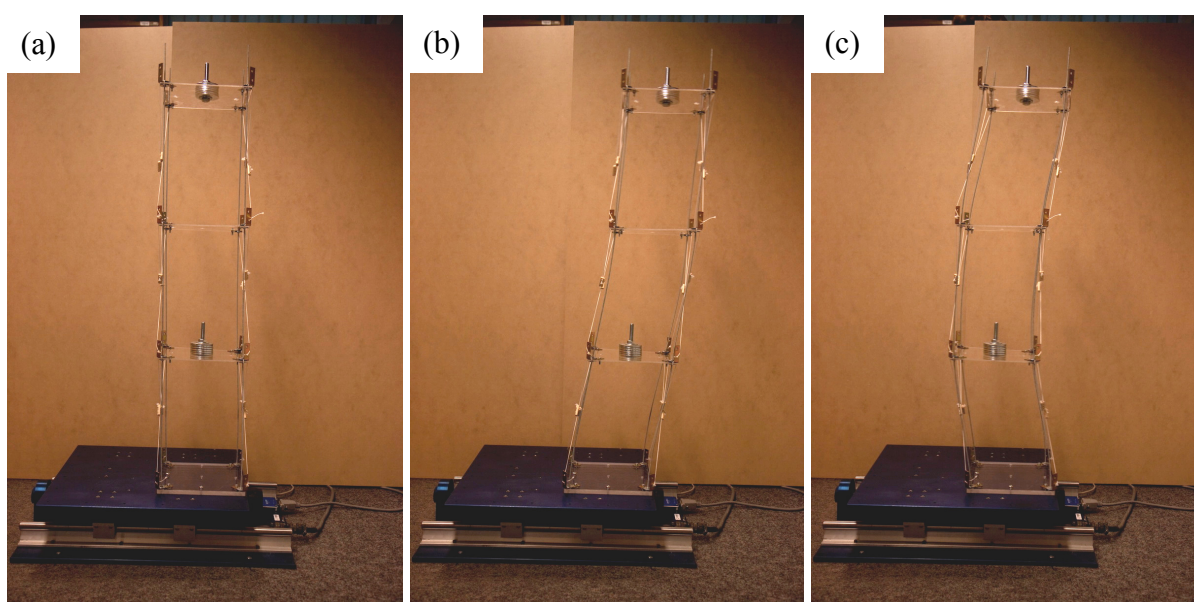
$$f_1 = 1.12 \text{ Hz}$$

$$T_1 = 0.89 \text{ s}$$

2. nihajna oblika

$$f_2 = 3.60 \text{ Hz}$$

$$T_2 = 0.28 \text{ s}$$



Slika 49: (a) Preizkušavec, (b) 1. nihajna oblika in (c) 2. nihajna oblika

4.3 Prikaz obnašanja nepravilnih konstrukcij

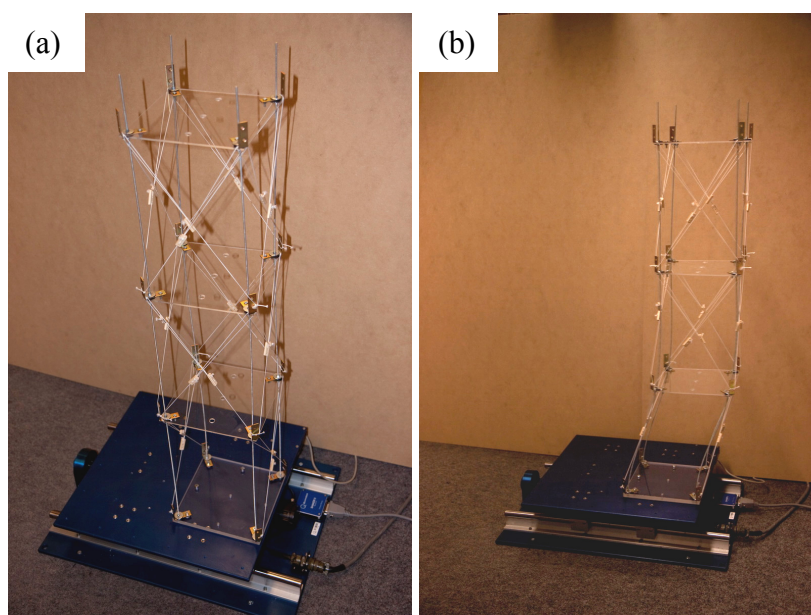
Z eksperimenti, ki jih obravnavamo v tem poglavju, smo želeli čim bolj nazorno prikazati vpliv nepravilnosti konstrukcije na dinamični odziv. Znano je namreč, da nepravilnosti v konstrukciji običajno povzročijo poslabšanje obnašanja konstrukcije pri dinamični obtežbi. Nepravilnosti smo uvedli tako, da smo spreminjali togost po višini in tlorisu preizkušanca. Pokazali smo tudi, da je izvor nepravilnosti v konstrukciji masa, ki je postavljeno izven centra togosti.

4.3.1 Spremenljiva togost po višini konstrukcije (mehka etaža)

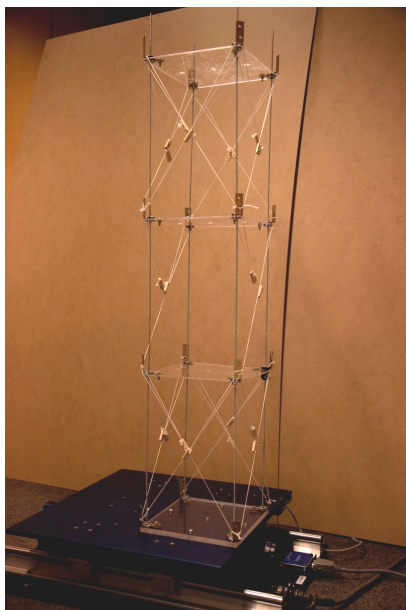
Posnetka na zgoščenki: Mehka etaža v pritličju.wmv in Mehka etaža v nadstropju.wmv

Konstrukcije so večkrat narejene tako, da se etažne togosti med seboj razlikujejo. Največkrat je najbolj podajna ravno pritlična etaža, kjer se koncentrirajo največje potresne sile. Etažo, ki ima izrazito manjšo togost od ostalih, imenujemo mehka etaža. Tam pride do največjih pomikov in deformacij, s tem do največjih poškodb in zato večkrat tudi do porušitve etaže.

Za prikaz pojava mehke etaže smo povečali togost dvema od treh etaž. Poleg diagonal, ki preprečujejo premikanje v pravokotni smeri na smer vzbujanja, namestimo še dodatne diagonale v smeri vzbujanja. Za simulacijo mehke etaže v pritličju (slika 50), dodamo diagonale v drugi in tretji etaži na obeh straneh. S tem se simulira neenakomerno razporeditev togosti po višini konstrukcije. Iz rezultatov eksperimenta je razvidno, da se deformacije v preizkušancu koncentrirane le v prvi etaži, v zgornjih dveh etažah, ki so bistveno bolj toge glede na spodnjo etažo, pa so deformacije zanemarljive. Podobne rezultate smo dobili tudi za primer, ko smo diagonale namestili v prvo in tretjo etažo (slika 51). V tem primeru je koncentracija deformacij nekoliko manj izrazita kot v primeru mehke etaže v pritličju.



Slika 50: (a) in (b) Mehka etaža v pritličju

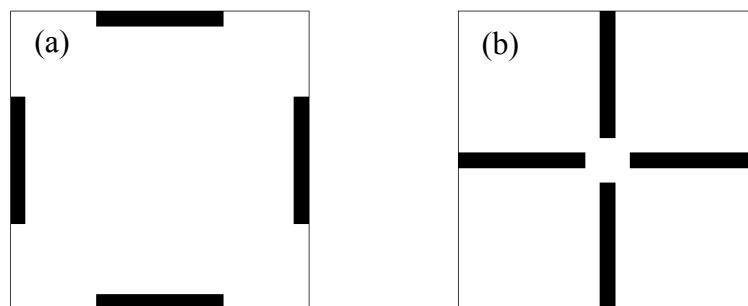


Slika 51: Mehka etaža v nadstropju

4.3.2 Nesimetrična togost po florisu konstrukcije (torzija)

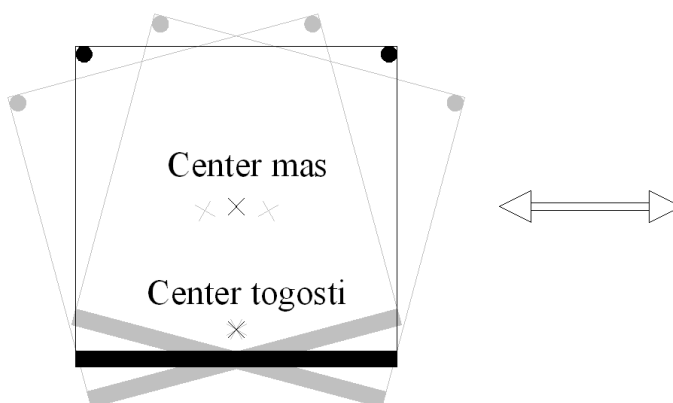
Posnetek na zgoščenci: Nesimetrična togost (torzija).wmv

Po nekaterih kriterijih ločimo konstrukcije na torzijsko toge in torzijsko podajne. Torzijska togost narašča z oddaljenostjo elementov od središča togosti s kvadratom ročice, zato je pomembno, da so nosilni elementi konstrukcije postavljeni čim bolj na rob konstrukcije (slika 52). Obnašanje torzijsko podajnih konstrukcij je razmeroma nepredvidljivo, saj lahko že majhna nepravilnost v togosti ali ekscentričnost mase povzroči neugodno torzijsko nihanje konstrukcije. Zato je potrebno torzijsko podajne konstrukcije dimenzionirati z bistveno večjimi potresnimi silami kot običajne konstrukcije. Standard EUROKOD 8 določa, da se za projektiranje torzijsko podajnih armiranobetonskih konstrukcij pri predpostavljeni srednji stopnji duktilnosti, lahko upošteva zelo nizek faktor obnašanja $q = 2$.



Slika 52: Primer tlorisa (a) torzijsko toge in (b) torzijsko podajne konstrukcije

Torzijska obremenitev nastopi, kadar se center mas in center togosti ne ujemata v isti točki, kot je prikazano na sliki 53. Torzijske obremenitve povzročajo prerazporeditev obtežbe tako, da razbremenijo močne nosilne elemente in dodatno obremenijo šibke.



Slika 53: Torzija v primeru neujemanja centra togosti in centra mas

Za možnost prikazovanja torzijskega gibanja sprostimo diagonale, ki onemogočajo premikanje konstrukcije v smeri pravokotno na vzbujanje.

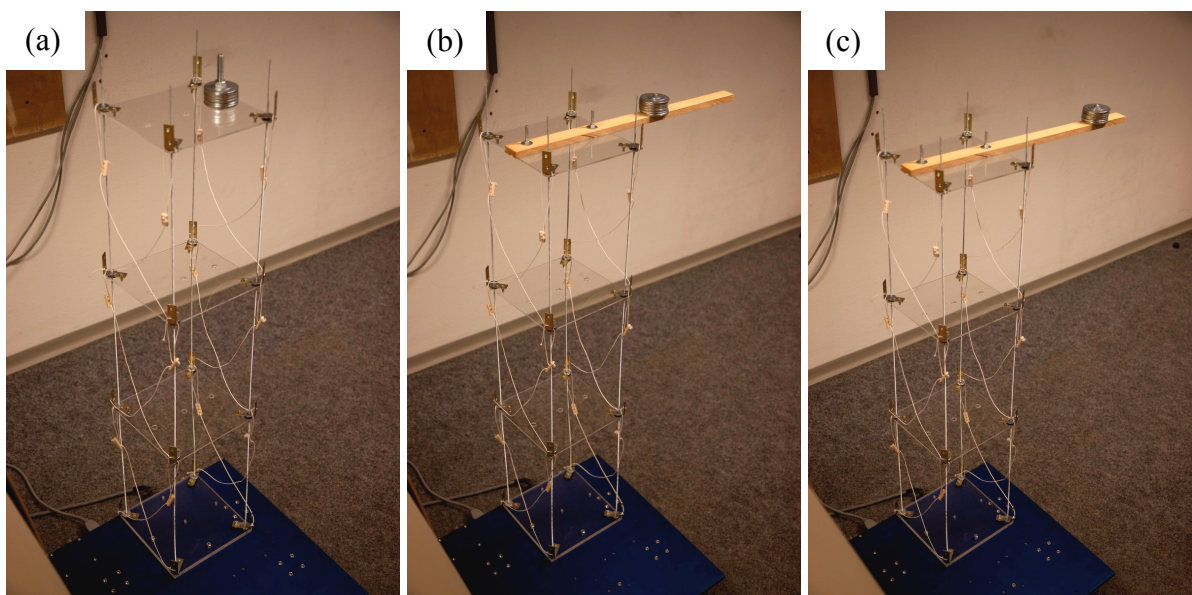
Nesimetrično togost po tlorisu simuliramo z uporabo diagonal v smeri vzbujanja na eni strani modela konstrukcije. To je shematsko prikazano na sliki 53, kjer je na spodnji strani ojačitev z diagonalami prikazana kot stena, na zgornji strani pa ostajata stebra konstrukcije prosta. Glede na zanemarljivo maso diagonal, ostaja center mas v središču konstrukcije, medtem ko se center togosti pomakne proti ravnini kjer so nameščene diagonale. Med vzbujanjem modela

konstrukcije kot prikazuje puščica na sliki 53 pride do torzijskega nihanja konstrukcije okoli centra togosti, kar je jasno vidno na posnetku, ki je na priloženi zgoščenci.

4.3.3 Nesimetrična postavitev mas po tlorisu konstrukcije (torzija)

Posnetki na zgoščenci: Izmaknjena masa (torzija) 1–3.wmv

Do torzijske obremenitve pride tudi v nekaterih drugih primerih. Poglejmo primer, ko je konstrukcija pravilna in simetrična, vendar je masa izmaknjena iz njenega središča. Zasnova eksperimenta je prikazana na sliki 54. Eksperiment se je ponovil za tri primere, ko je bila dodatna masa postavljena na različnih mestih. V prvem primeru je bila dodatna masa sicer izmaknjena iz tlorisnega centra konstrukcije, vendar je bila še vedno na površini konstrukcije. V naslednjih dveh primerih smo dodatno maso postavili izven tlorisa konstrukcije. V primeru, ki je prikazan na sliki 54a, ne pride do velikih torzijskih nihanj, vendar se torzijsko nihanje povečuje z večanjem ekscentričnosti dodatne mase. Ta model lahko primerjamo z obstoječo stolpnico na Bavarskem dvoru.



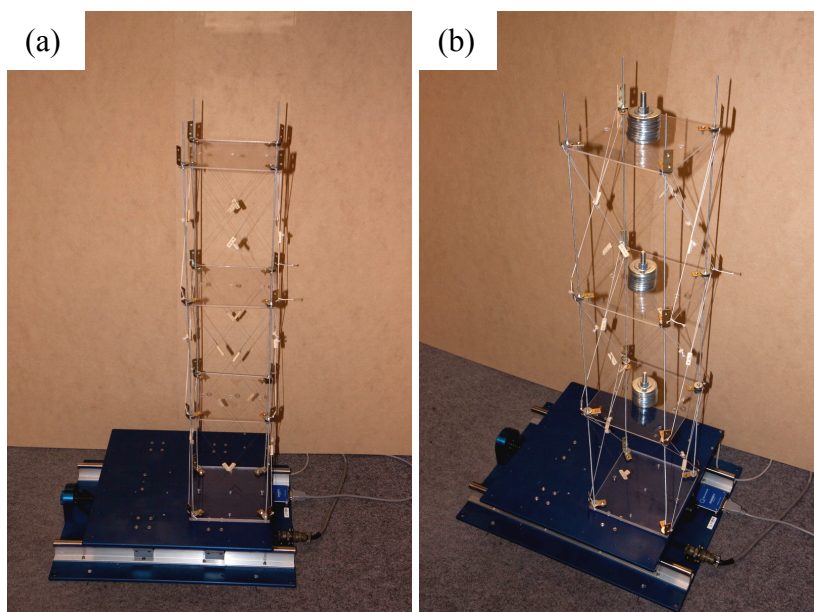
Slika 54: Masa izmaknjena iz centra togosti za (a) 7 cm, (b) 21 cm in (c) 35 cm

4.4 Prikaz koncentracije potresnih sil v spodnji etaži

Posnetek na zgoščenki: Koncentracija potresne obtežbe.wmv

V potresu v Turčiji (*Kocaeli* potres iz leta 1999) se je porušilo veliko število večetažnih armiranobetonskih okvirnih stavb z opečnimi polnili. Tipično so se stavbe porušile po prvi ali drugi etaži. V tistih stavbah, ki so bile samo poškodovane se je jasno videlo, da so bile poškodbe koncentrirane v spodnjih etažah, medtem, ko so zgornje etaže ostale praktično nepoškodovane. Ker so bile stavbe pravilne po višini je bil takšen tip porušitve deloma nepričakovan. Dolšek in Fajfar (2001) sta ugotovila, da se armiranobetonski okviri, ki so s polnili enakomerno zapolnjeni po višini, rušijo po prvi etaži, saj so etažne prečne sile, ki se pojavijo zaradi potresa največje v prvi etaži. Zato se najprej poškodujejo polnila v spodnjih etažah, kar povzroči neregularno nosilnost konstrukcije, tako imenovani efekt mehke etaže.

Za nazoren prikaz tega pojava smo v preizkušane vgradili šibke diagonale, ki ob večji sili počijo. Za diagonale smo uporabili sukanec, ki smo ga namestili simetrično v vse etaže (slika 55). Vsako etažo smo obtežili z 1 kg dodatne mase, zaradi česar pride do večjih horizontalnih sil. Eksperiment smo začeli s počasnim premikanjem potresne mize po sinusnem signalu. Nato smo frekvenco sinusnega nihanja povečevali, s čimer smo povečali obremenitev na preizkušane. Med eksperimentom smo opazovali v kateri etaži pride najprej do porušitve šibkih diagonal. Po pričakovanju najprej odpovejo diagonale v pritličju, kar je nazoren dokaz za koncentracijo sil v spodnji etaži. Zaradi popuščenja napetosti diagonal med povečevanjem frekvence sinusnega signala, pride med eksperimentom do rahlih odstopanj, zato se na posnetku ob istem trenutku pretrga tudi diagonala v drugi etaži.



Slika 55: (a) in (b) Priprava modela konstrukcije za prikaz koncentracije sil v pritličju

4.5 Prikaz odziva konstrukcije pri dejanskih potresih

Pri dejanski potresni obtežbi pride v konstrukcijah do vrste različnih dinamičnih pojavov. Nekaj teh smo eksperimentalno prikazali v prejšnjih poglavjih. Do katerega od pojavov pride je odvisno od vrste parametrov potresne obtežbe, lokalne sestave temeljnih tal in same konstrukcije. Kombinacija parametrov določa tudi jakost pojavov in vpliv na obnašanje konstrukcij, zato je težko opredeliti kateri od parametrov je najpomembnejši za določitev odziva konstrukcij.

Za prikaz odziva konstrukcije pri dejanskih potresih uporabimo zapis treh svetovno znanih potresov s približno enako magnitudo. V spodnji preglednici so zbrani osnovni podatki obravnavanih potresov.

Preglednica 10: Osnovni podatki obravnavanih potresov

Potres	<i>Kobe</i>	<i>Northridge</i>	<i>Petrovac</i>
Država	Japonska	ZDA	Črna gora
Datum	17.1.1995	17.1.1994	15.4.1979
Magnituda	7.2	6.7	7.0
Največja intenziteta	VII (JMA)	IX (MM)	IX (MCS)
Največji izmerjen pospešek tal [g]	0.83	0.98	0.47
Trajanje močnega dela potresa [s]	20	15	10
Globina [km]	14	17	12
Približno število smrtnih žrtev	6400	70	140
Ocena škode	80 milijard €	15 milijard €	25 milijard €

Vrednosti za magnitudo potresov v zgornji preglednici so zapisane glede na *Rihter*-jevo lestvico. Intenziteta se lokacijsko spreminja, v zgornji preglednici pa je zapisana vrednost najvišje določene intenzitete za posamezen potres. Japonska meteorološka agencija (*Japan Meteorological Agency*) uporablja svojo lestvico za določanje intenzitete potresov, v kateri je podan tudi podatek za intenziteto potresa *Kobe*. Japonska lestvica ima sedem stopenj, kar pomeni, da je potres *Kobe* dosegel najvišjo intenziteto po tej lestvici. Podatek za intenziteto potresa *Northridge* je podan po lestvici *MM* (*Modificirana Mercallijeva lestvica*), za potres *Petrovac* pa po lestvici *MCS* (*Mercalli-Cancani-Sieberg*). Zadnji dve lestvici imata 12 stopenj.

4.5.1 Priprava podatkov za eksperiment

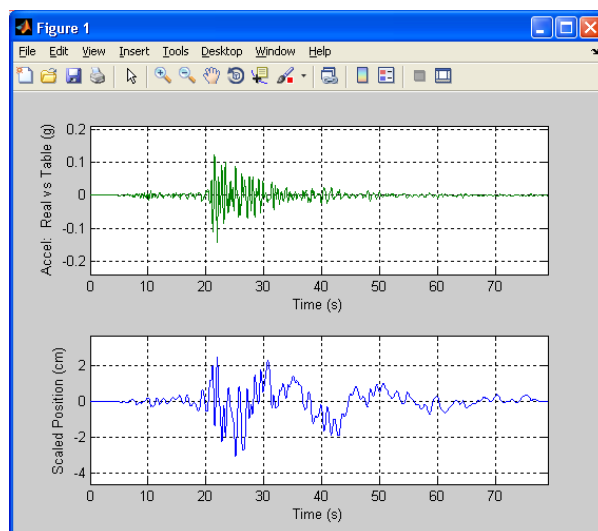
V nadaljevanju prikažemo postopek priprave vhodnih podatkov za simulacijo potresa na primeru zapisa za potres *Kobe*, izmerjenim na postaji *HIK* v smeri *000*. Dogajanje med potresi beležijo različne postaje po svetu, zato se izmerjene vrednosti za pospeške, hitrosti in pomike za posamezen potres med seboj razlikujejo. Zapisi pospeškov med potresi so zapisani v

različnih načinov odvisno od baze podatkov iz katere črpamo zapis. Eden izmed načinov zapisa pospeškov je prikazan na sliki 56, kjer so posamezne vrednosti s korakom 0.02 s zapisane v petih stolpcih.

```
PEER STRONG MOTION DATABASE RECORD. PROCESSING BY PACIFIC ENGINEERING.
KOBE 01/16/95 2046, HIK, 000
ACCELERATION TIME HISTORY IN UNITS OF G. FILTER POINTS: HP=0.05 Hz LP=unknown
NPTS= 3900, DT= .02000 SEC
-.1143813E-06 -.1004171E-06 -.1062466E-06 -.1031916E-06 -.1051555E-06
-.1060794E-06 -.1075356E-06 -.1142481E-06 -.7369108E-07 -.7171020E-07
-.6329214E-07 -.5989914E-07 -.5224164E-07 -.1529145E-06 -.1579951E-06
-.1685484E-06 -.1729809E-06 -.1850760E-06 -.1890013E-06 .9059694E-08
-.2111923E-06 -.2188611E-06 -.2313597E-06 -.2441770E-06 .7832897E-07
-.2703382E-06 -.2795208E-06 -.2983754E-06 -.3056207E-06 .1579398E-06
```

Slika 56: Del zapisa pospeškov za potres *Kobe, HIK, 000*

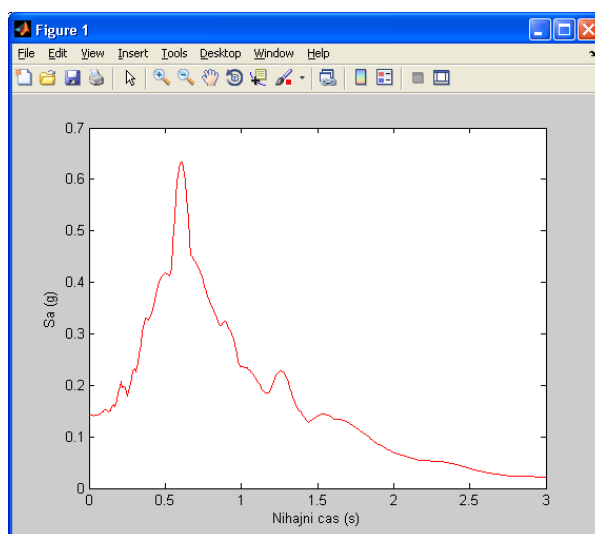
Iz takšnega zapisa se nato s programsko opremo *QuaRC* generira akcelrogram in diagram pomikov (slika 57). Pomiki potresne mize se določijo tako, da ne presegajo zmogljivosti potresne mize in hkrati zagotavljajo ponovitev zabeleženih pospeškov med dejanskim potresom. Pri kalibraciji pomikov glede na kapaciteto potresne mize, se spremeni frekvenčna sestava osnovnega akcelrograma in čas trajanja signala.



Slika 57: Akcelrogram dejanskih pomikov in prirejeni pomiki za potres *Kobe, HIK, 000*

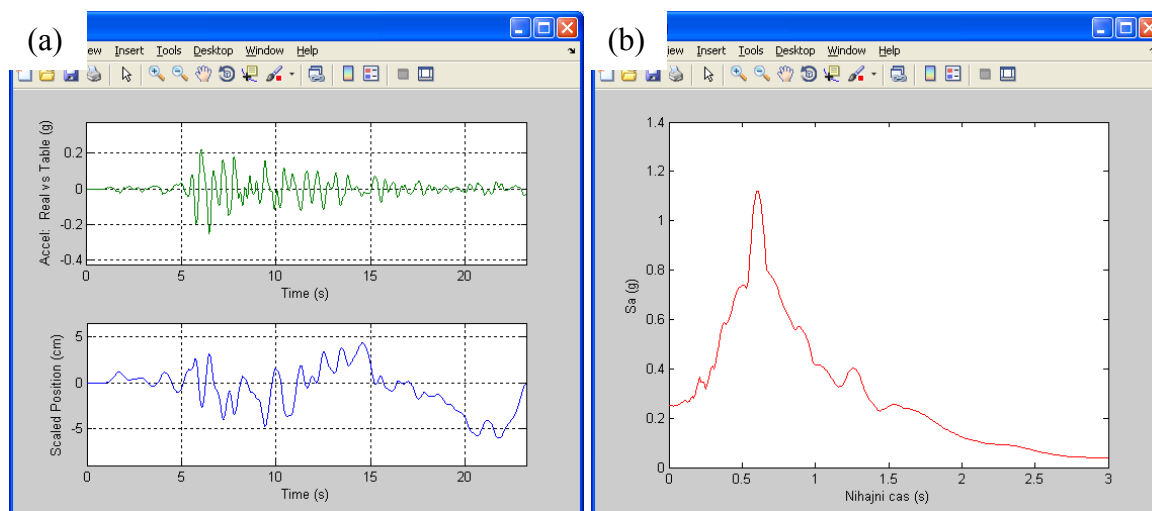
Spekter pospeškov prikaže prevladujoče periode potresa, ki vplivajo na amplifikacijo obtežbe, ki deluje na konstrukcijo. Spekter pospeškov za obravnavani primer je izrisan na sliki 58. Spektri po definiciji predstavljajo maksimalni odziv sistema z eno prostostno stopnjo pri

določeni dinamični obtežbi, v odvisnosti od periode sistema in od dušenja. Spekter pospeškov prikazuje na abscisni osi nihajni čas konstrukcij, na ordinatni osi pa pripadajoči pospešek. V primeru absolutno toge konstrukcije, z nihajnim časom $T = 0$ s, je pospešek, ki deluje na konstrukcijo enak pospešku tal (Fajfar, 1995). Sicer se pospešek, ki deluje na konstrukcijo, poveča ali pa pri velikih nihajnih časih celo zmanjša. Pri vseh izračunih spektrov v nalogi se upošteva 5% dušenje.



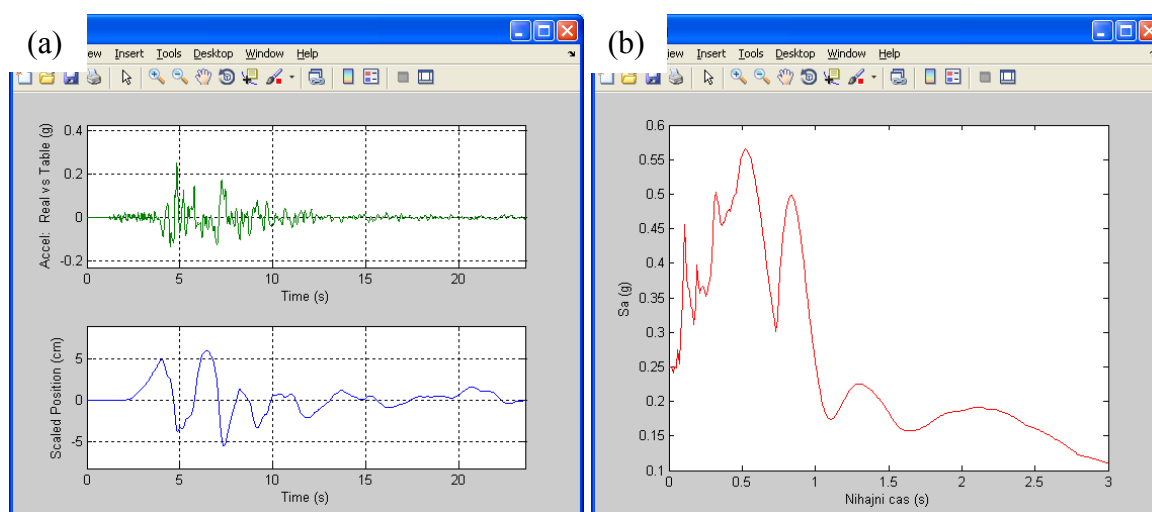
Slika 58: Spekter pospeškov za potres *Kobe, HIK, 000*

Za enostavnejšo primerjavo različnih potresov, ki jih bomo simulirali s potresno mizo, kalibriramo pospeške na maksimalni pospešek 0.25 g (slika 59a). To je največja vrednost referenčnega projektnega pospeška, ki se ga uporablja v Sloveniji za projektiranje običajnih objektov. Za eksperiment smo uporabili le del zapisa potresa z največjimi pospeški. Upoštevali smo samo pospeške v močnem delu akceleroograma tako, da smo eksperiment izvedli za približno 20 s signala. Izrišemo lahko spekter pospeškov, ki ustreza kalibraciji na 0.25 g (slika 59b). V tem primeru ostane oblika spektra nespremenjena, le vrednosti pospeškov na ordinatni osi se spremenijo.

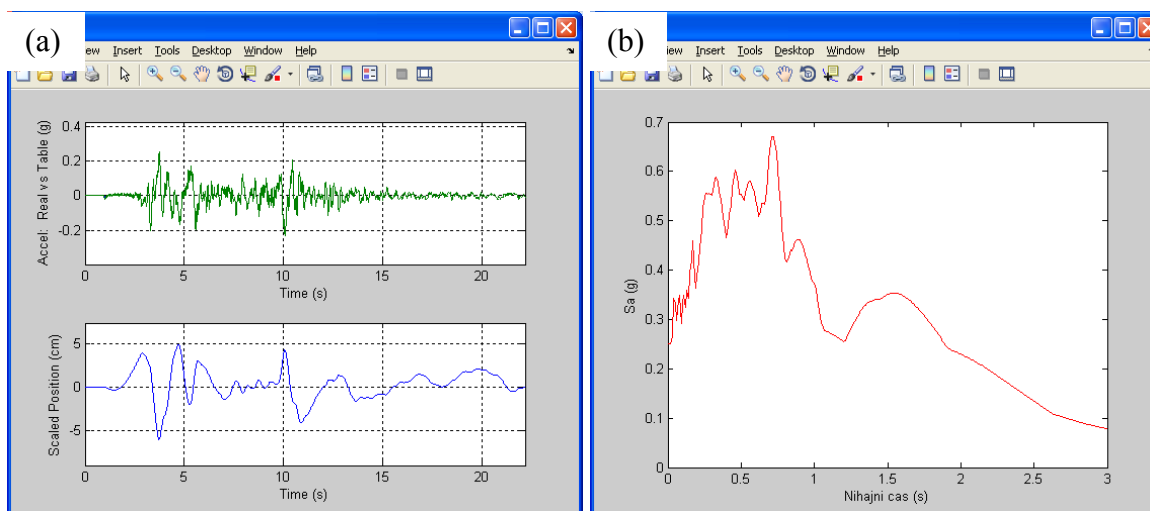


Slika 59: (a) Kalibriran akceleroگرام in prirejeni pomiki ter
(b) pripadajoč spekter pospeškov za potres *Kobe, HIK, 000*

Na podoben način smo pripravili podatke tudi za potresa *Northridge* in *Petrovac*, kar je prikazano na spodnjih slikah. Spektri pospeškov za tri obravnavane zapise gibanja tal (*Kobe*, *Northridge* in *Petrovac*) so precej različni. Največji spektralni pospešek se pojavi pri zapisu potresa *Kobe*. V tem primeru je pospešek na konstrukcij večji kar za približno 5 krat v primerjavi z maksimalnim pospeškom tal. Za ostala dva potresa, je maksimalni spektralni pospešek bistveno manjši, vendar so sorazmerno visoke vrednosti spektralnih pospeškov dosežene na širokem območju nihajnih časov.



Slika 60: (a) Kalibriran akceleroگرام in prirejeni pomiki ter
(b) pripadajoč spekter pospeškov za potres *Northridge, Sylmar – hospital, 090*

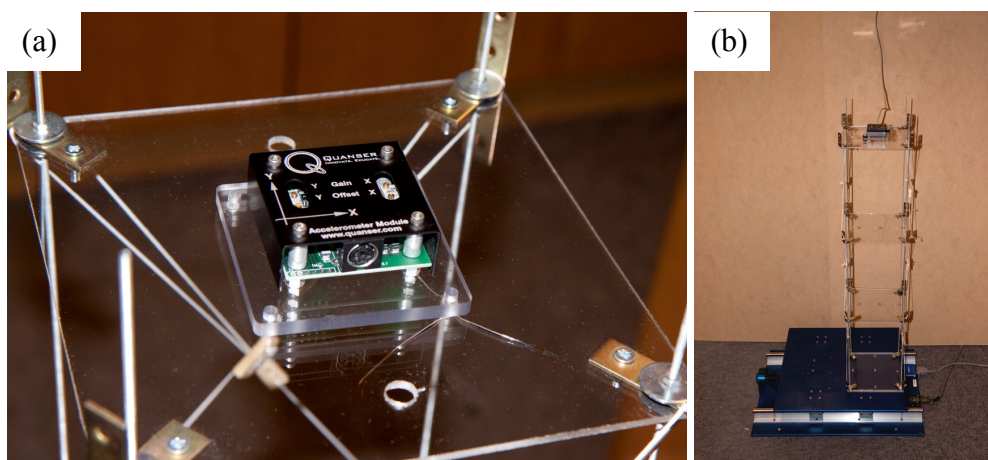


Slika 61: (a) Kalibriran akcelerogram in prirejeni pomiki ter (b) pripadajoč spekter pospeškov za potres *Petrovac, Hotel Oliva, 198y*

4.5.2 Prikaz obnašanja različnih konstrukcij med potresom *Kobe*

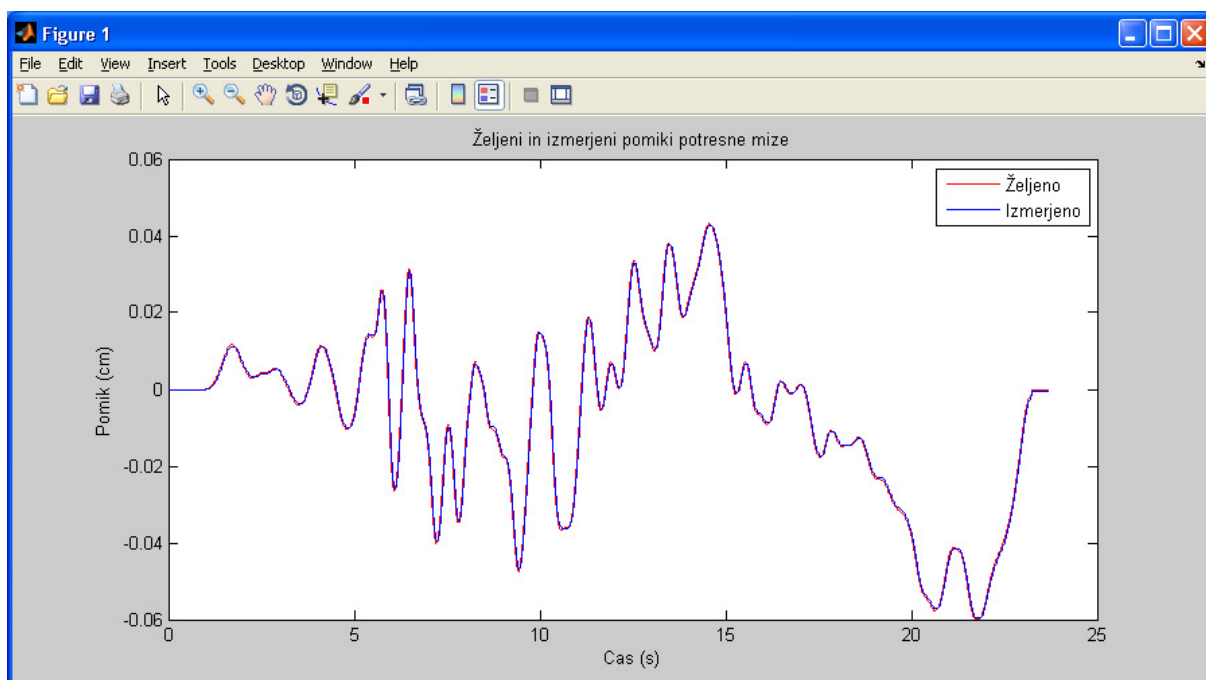
Posnetki na zgoščenki: Kobe 1–7.wmv

V tem primeru smo pripravili eksperimente s katerimi prikazujemo obnašanje različnih preizkušancev za akcelerogram, ki ustreza potresu *Kobe*. Med eksperimenti smo beležili željeni in izmerjeni pomik potresne mize, pospešek potresne mize in pospešek na vrhu modela konstrukcije. Pospeškometer smo namestili na vrhu konstrukcije, kot je prikazano na sliki 62.



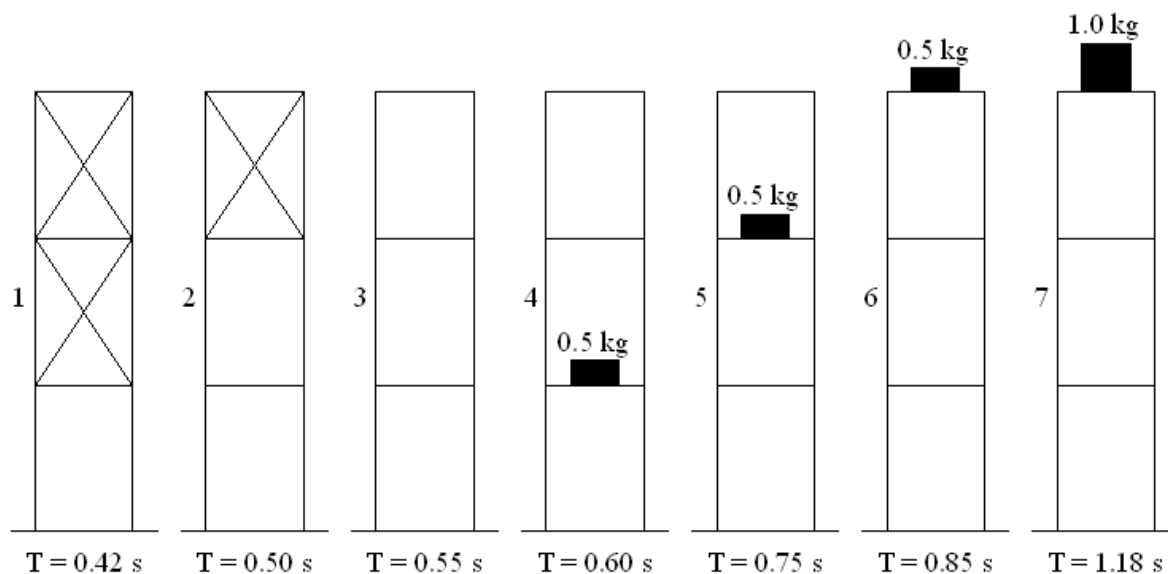
Slika 62: (a) in (b) Pospeškometer pritrjen na vrh modela konstrukcije

Pripravljeni signal, ki je prikazan na sliki 59a, smo simulirali s potresno mizo. Diagram na sliki 63 prikazuje ujemanje željenega in izmerjenega pomikanja potresne mize, kjer je vidno, da potresna miza zelo dobro sledi željenim pomikom, ki zagotavljajo ponovitev izmerjenih pospeškov med dejanskim potresom.



Slika 63: Željeni in izmerjeni pomiki potresne mize

Oblika spektra pospeškov za akcelerogram potresa *Kobe*, ki je prikazan na sliki 59b, je idealna za prikaz odziva konstrukcij z različnimi nihajnimi časi med simuliranjem potresa. V ta namen smo z enakim signalom vzbujali različne preizkušance, ki so prikazani na sliki 64. Preizkušanci se razlikujejo po dodani masi ali togosti, ki smo jo povečevali z diagonalami. Vsak preizkušanec je na sliki 64 označen z zaporedno številko, poleg pa je napisan pripadajoč nihajni čas. Nihajni časi preizkušancev se gibljejo od 0.42 do 1.18 s.

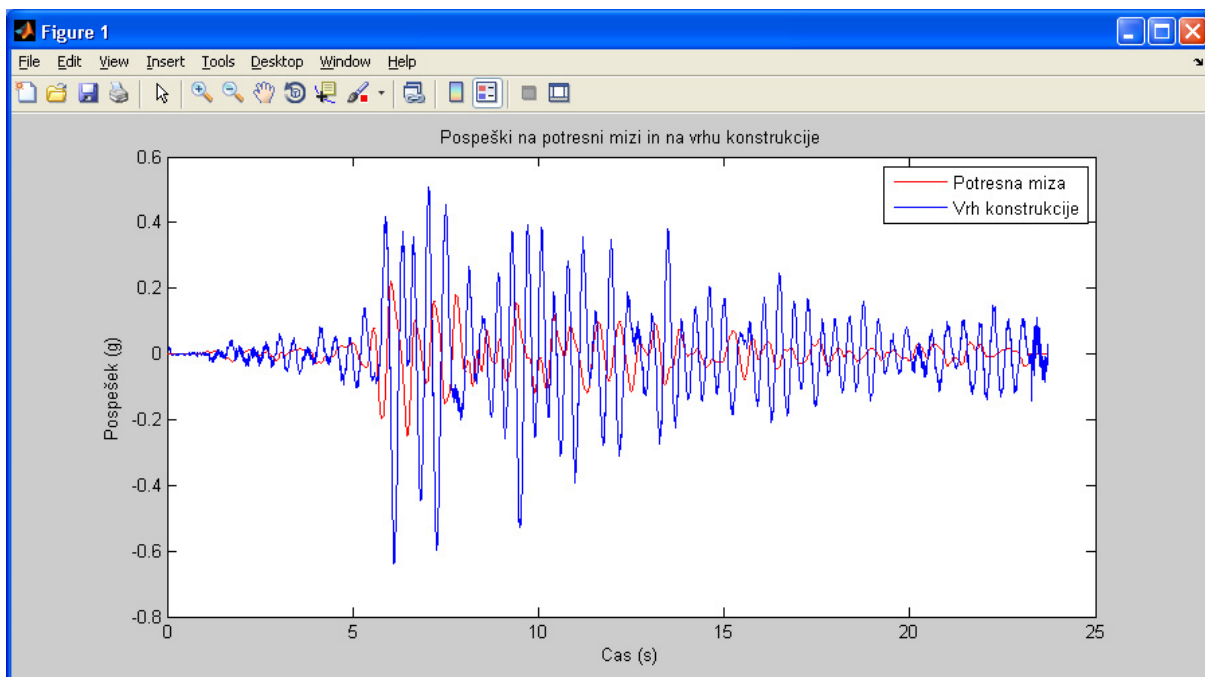


Slika 64: Preizkušanci z različnimi nihajnimi časi

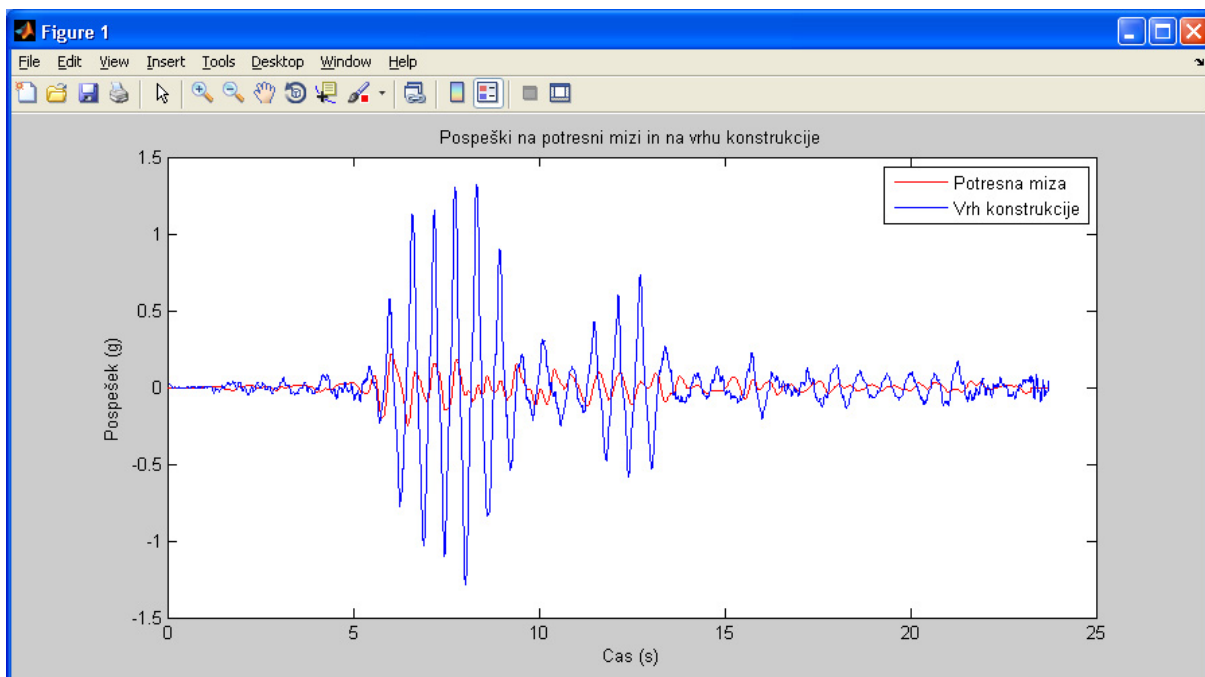
Diagrami izmerjenih pospeškov na vrhu preizkušancev med potresno obtežbo najboljše prikazuje vpliv potresne obtežbe na preizkušance. Do največje amplifikacije pospeškov na vrhu glede na pospeške potresne mize pride pri osnovni konstrukciji pod zaporedno številko 3 z nihajnim časom 0.55 s. Sicer amplifikacija pospeškov s pomikanjem proti krajšim ali daljšim nihajnim časom upada.

Na slikah od 65 do 67 poleg amplifikacije pospeškov opazimo tudi različen frekvenčni sestav zapisa pospeška za preizkušance 1, 3 in 7. Konstrukcije s krajšimi nihajnimi časi nihajo z višjo frekvenco in obratno.

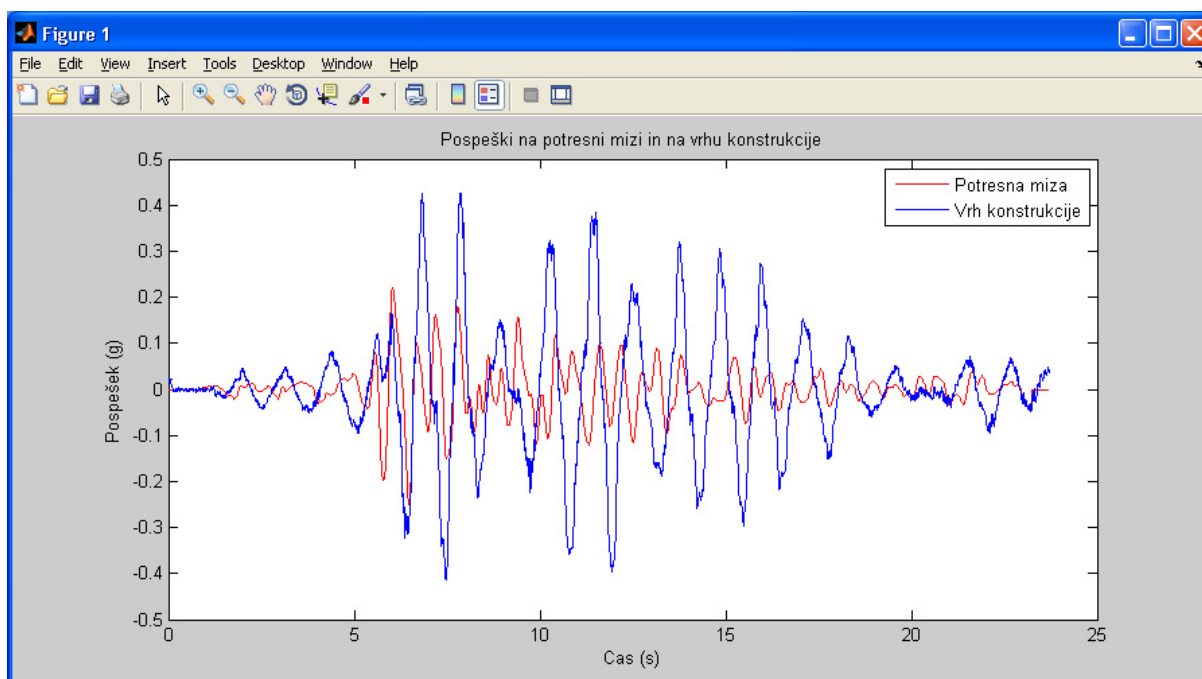
Eksperimenti nazorno pokažejo, da se različne konstrukcije pri enakem potresu drugače obnašajo. Nazorno je prikazana razlika med pospeškom tal in pospeškom vrha konstrukcije ter uporaba in namen spektrov pospeškov.



Slika 65: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 1 pri simulaciji potresa *Kobe*



Slika 66: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3 pri simulaciji potresa *Kobe*



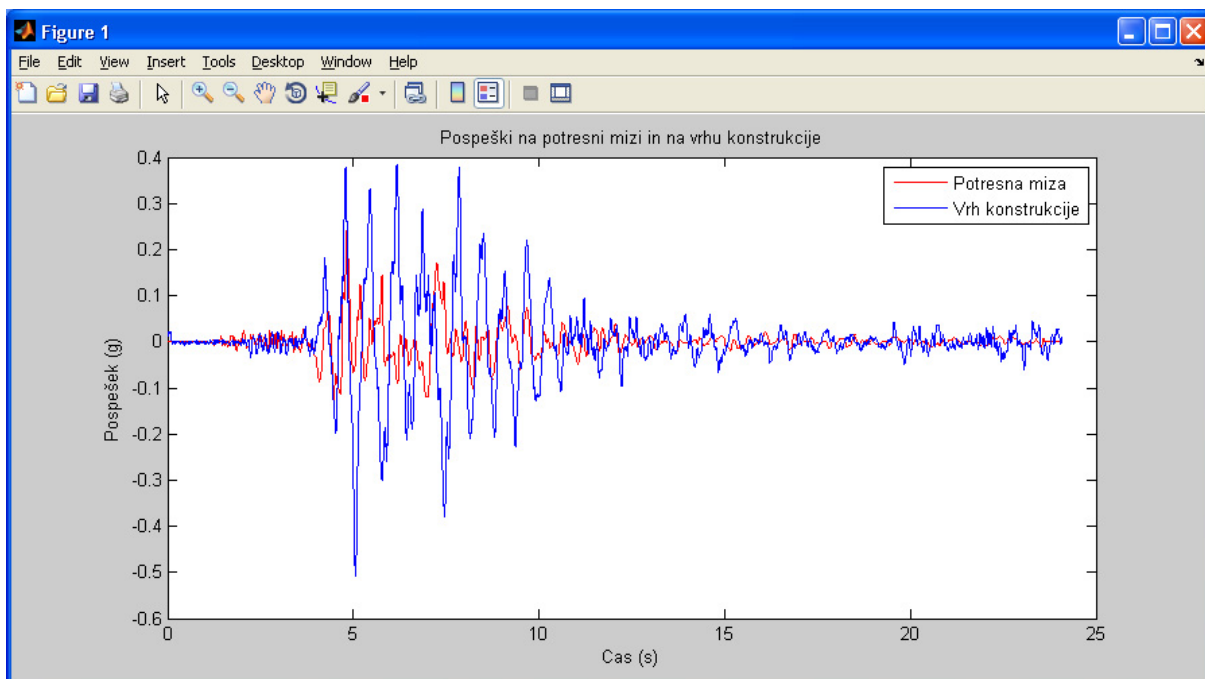
Slika 67: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 7 pri simulaciji potresa *Kobe*

4.5.3 Prikaz obnašanja konstrukcije med različnimi potresi

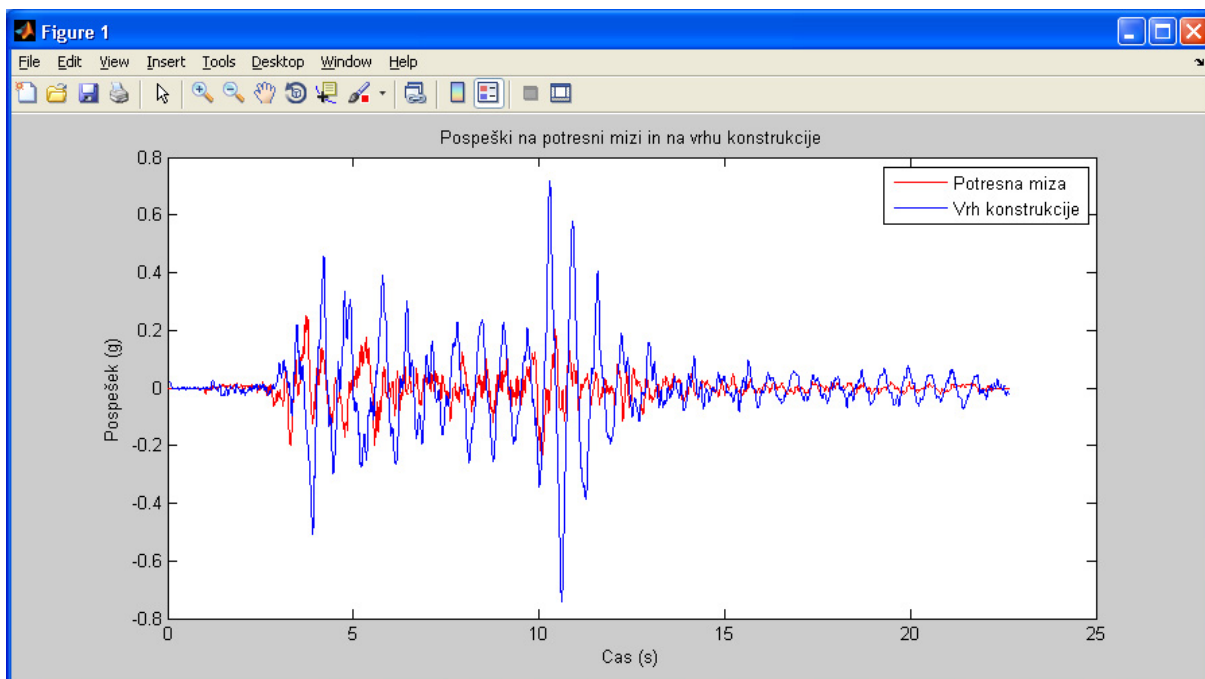
Posnetka na zgoščenki: Northridge.wmv in Petrovac.wmv

Za enako zasnovano konstrukcijo pri kateri je prišlo med simuliranjem potresa *Kobe* do največjih amplifikacij pospeškov (Slika 64, konstrukcija 3) smo izvedli še eksperiment za potresa *Northridge* in *Petrovac*. S tem primerjamo odziv konstrukcije med različnimi potresnimi obtežbami, ko ostali pogoji ostajajo enaki.

Na slikah 68 in 69 sta prikazana diagrama primerjave pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu modela konstrukcije za simulacijo potresov *Northridge* in *Petrovac*. Glede na to, da se spektri posameznih potresnih obtežb med seboj razlikujejo, se razlikuje tudi odziv konstrukcije.



Slika 68: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3
pri simulaciji potresa *Northridge*



Slika 69: Primerjava pospeškov potresne mize in pospeškov na vrhu preizkušanca 3
pri simulaciji potresa *Petrovac*

5 ZAKLJUČEK

Uporaba eksperimentalnega pristopa je osnovnega pomena na raziskovalnem in izobraževalnem področju. V potresnem inženirstvu se preizkuša odziv konstrukcij na potresno obtežbo pri čemer se uporablja različno strojno opremo. Za eksperimente na konstrukcijah v naravnem merilu se običajno uporabljajo reakcijske stene ali potresne mize. Cilj preučevanja obnašanja konstrukcij med potresi je boljše razumevanje dinamike gradbenih konstrukcij. Takšno znanje je potrebno za kvalitetno potresnoodporno gradnjo objektov, posledično pa takšno znanje zmanjšuje potresno tveganje. Glede na to, da so potresno ogrožena področja razporejena širom po svetu, so tudi raziskovalni centri locirani po različnih državah in kontinentih. Takšni centri se povezujejo v različna združenja kot na primer mreža *NEES* v Ameriki ali projekt *SERIES* v Evropi.

Globalni parametri konstrukcij, ki odločilno vplivajo na obnašanje konstrukcij, so nosilnost, duktilnost in togost, skupaj z maso in dušenjem. Pri konstrukcijah z veliko nosilnostjo pride med potresi do manjših poškodb, vendar lahko učinkuje dodatna nosilnost tudi negativno, saj se lahko zaradi neprimerne razporeditve nosilnosti med elementi konstrukcije pojavijo manj primerni porušnih mehanizmi. Duktilnost konstrukcij ima velik pomen, saj omogoča obnašanje konstrukcije v nelinearno področje in tako veliko sipanje energije med močnimi potresi. Duktilnost konstrukcij je potrebno zagotoviti s primernim materialom, zasnovo konstrukcije, s primernimi konstrukcijskimi elementi in detajli. Pri pravilnem projektiranju konstrukcij zagotovimo zahtevano nosilnost in duktilnost elementov konstrukcije ter tako kontroliramo globalno obnašanje konstrukcije (metoda načrtovanja nosilnosti). Togost in mase določajo lastno nihanje konstrukcije, s pomočjo katerega razlagamo odziv konstrukcije pri potresni obtežbi. Do največjih potresnih sil pride v primeru, ko se osnovni nihajni čas ujema s prevladujočimi periodami potresa. Dušenje ugodno vpliva na odziv konstrukcij, saj zmanjšuje amplitude nihanja.

Med delovanjem potresov se vzpostavi povsem drugačno obtežno stanje kot običajno, saj je konstrukcija poleg vertikalne obtežbe dodatno obtežena z velikimi horizontalnimi silami.

Zaradi tega pride do nekaterih značilnih in največkrat neugodnih pojavov kot na primer vzpostavitev mehke etaže, torzijsko gibanje, koncentracija potresne obtežbe v pritličju, diagonalne strižne razpoke, izpadanje polnil iz svoje ravnine, lom na stiku delov konstrukcije z različno togostjo in podobno. Večino teh pojavov se lahko občutno zmanjša s primerno zasnovo, dimenzioniranjem in konstruiranjem konstrukcije.

Poleg raziskovalne dejavnosti ima izvajanje eksperimentov pomembno vlogo tudi pri izobraževalnem procesu, pri katerem si ne moremo privoščiti uporabe velikih potresnih miz, ki so prezahtevne in predrage za uporabo. Zato smo v ta namen uporabili majhno potresno mizo Quanser Shake Table II, ki se uporablja na več kot 100 univerzah. Pred uporabo šolske potresne mize smo v okviru naloge vzpostavili celoten sistem komponent, ki so potrebne za pravilno delovanje potresne mize. Poleg tega je bilo potrebno preučiti in nastaviti načine upravljanja potresne mize. Programska oprema *Shake Table II Software* in pripravljene kontrolerji v programskem okolju *Matlab/Simulink* omogočajo pošiljanje različnih signalov za premikanje potresne mize in hkrati zbiranje različnih izmerjenih vrednosti kot na primer pomiki, hitrosti, pospeški potresne mize in pospeški obravnavanega modela konstrukcije. Za natančnejše beleženje gibanja modelov konstrukcij je potrebno pridobiti še dodatne merilce pospeškov, glede na to, da je trenutno na voljo le en pospeškomer s katerim je potrebno meriti pospeške potresne mize. Kljub majhnim dimenzijam potresne mize se lahko z njo predstavi različne dinamične pojave glede na široko izbiro eksperimentov, ki so jih z uporabo enake strojne opreme naredili na univerzah drugod po svetu.

Za izvedbo eksperimentov je bilo potrebno v začetku pripraviti ustrezen model konstrukcije. Ta mora imeti primerno togost oz. podajnost za prikaz deformacij konstrukcije pri obtežbi, ki jo generira potresna miza, in hkrati zagotavljati podobno obnašanje kot ga izkazujejo dejanske konstrukcije. Za boljši prikaz translatornega gibanja smo uporabili diagonale, ki so povečale togost modela konstrukcije v pravokotni smeri na vzbujanje. V modelu smo omogočili poljubno nameščanje mase po tlorisu etaž, povečanje togosti pa smo dosegli z uporabo dodatnih diagonal v smeri vzbujanja. S kombinacijo različnih mas in togosti smo na ta način lahko hitro pripravili različne preizkušance.

Izkazalo se je, da je težko zagotoviti željene robne pogoje, ki se jih večkrat brez pomisleka uporabi pri analitični ali numerični obravnavi konstrukcij. Pri modelu konstrukcije smo namreč želeli zagotoviti togo vpetje na vseh stikih, vendar se je izkazalo, da s tem načinom konstruiranja lahko zagotovimo le delno vpetje.

Eden izmed številnih opravljenih eksperimentov je pokazal močan vpliv diagonal na togost konstrukcije v smeri postavitve diagonal, medtem, ko ostane obnašanje v pravokotni smeri enako kot brez uporabe diagonal.

Eksperimente, ki prikazujejo dinamično obnašanje modelov konstrukcij, smo posneli in zbrali na priloženi zgoščenki. Na posnetkih je nazoren prikaz določitve lastnih nihajnih oblik s pomočjo resonance. Eksperimentalno določene vrednosti lastnih nihajnih časov se dobro ujemajo z analitično rešitvijo posplošenega problema lastnih vrednosti, pri čemer smo podajnostno matriko preizkušanca določili s pomočjo silomera. Pokazali smo tudi, da so nepravilne konstrukcije manj primerne za gradnjo. Zaradi neenakomerno razporejene togosti po višini pride do velikih lokalnih deformacij na mestih manjše togosti, kar opisujemo s pojavom mehke etaže. Neenakomerna razporeditev togosti in mas po tlorisu konstrukcije pa se odraža v vzpostavitvi torzijskega gibanja, ki razbremeni močne elemente in še dodatno obremeni šibke. Z enim od eksperimentov smo prikazali koncentracijo potresne obtežbe v spodnjih etažah, kar je še posebno problematično v primeru pojava mehke etaže v pritličju, kjer se zaradi raznih arhitektonskih zahtev običajno pojavi mehka etaža. V zadnjem sklopu eksperimentov smo pokazali, da so med določenim potresom najbolj obremenjene konstrukcije, katerih periode se najbolj ujemajo s prevladujočimi periodami potresa.

Opravljeni eksperimenti kažejo, da je šolska potresna miza *Quanser Shake Table II* dober učni pripomoček, ki bo ob primerni uporabi, pomagal pri pridobitvi razumevanja in intuicije za dinamično obnašanje gradbenih konstrukcij med študenti Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

6 VIRI

Bennion S., Collins J., Wongprasert N. M. 2002. Shaking Table Demonstration of Dynamic Response of Base-Isolated Buildings. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Berton, S. in sod. 2004. Dynamic Behaviour of Simple Soil-Structure Systems. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Caicedo, J. M., Betancourt, S., Dyke, S. J. 2001. Introduction to Dynamics of Structures. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Choi, C. in sod. 2002. Demonstration of Lateral-Torsional Coupling in Building Structures. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Chopra, A. K. 2007. Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering. Upper Saddle River, NJ 07458, Pearson Prentice Hall: 876 str.

Dolšek M., Fajfar P. 2001. Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames. Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, 5(1):1-12.

Dyke, S. J. 2009. MDOF System: Vibration Absorber, UCIST in partnership with NEES. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (15.08.09).

Dyke, S. J., Caicedo, J. M. 2002. The University Consortium on Instructional Shake Tables. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/publications/publications.htm> (10.02.09).

Earthquake shaking table. http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_shaking_table (19.08.09).

Elnashai, A. S., Di Sarno, L. 2008. Fundamentals of earthquake engineering. Chichester, John Wiley & Sons Ltd: 347 str.

Eurocode 8. 2004. Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European standard prEN 1998-1, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., Stratan, A. 2006. Pre- and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2006; 35:1359–1379.

Fajfar, P., Poljanšek, K., Dolšek, M., Peruš, I., Fischinger, M. 2004. Ranljivi nanosi na togi podlagi - dragoceni podatki za Eurocode 8. *Delo*, 29. julij 2004, letn. 46, str. 15.

Fajfar, P. 1995. *Osnove potresnega inženirstva*. 2. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 83 str.

Fajfar, P. 1984. *Dinamika gradbenih konstrukcij*. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.

Fischinger, M. 1999. *Projektiranje potresnoodpornih armiranobetonskih konstrukcij*, 1. del Splošno in stavbe. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo: 88 str.

George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES). <https://www.nees.org/about/organization/> (20.08.09).

Joint Research Centre. <http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm> (17.08.09)

Lynch, J. P., Loh, K. J. 2006. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, March 2006, 91-128.

Manfredi, G. (ur.), Dolce, M. (ur.). 2009. *The state of Earthquake Engineering Research in Italy: the ReLUIIS-DPC 2005-2008 Project*. Napoli, Doppiavoce: 495 str.

McMullin, K. M. 2005. Earthquake-resistant Bridge Competition.

<http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Negro, P., Mola, E., Molina, F. J., Magonette, G. E. 2004. Full-scale PsD testing of a torsionally unbalanced three-storey non-seismic RC frame. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 968.

Ohtani, K., Ogawa N., Katayama T., Shibata, H. 2003. Construction of E-Defense (3-D full scale earthquake testing facility). <http://www.bosai.go.jp/hyogo/ehyogo/research.html> (20.08.09).

Ranf R. T., Dyke, S. J. 2001. University Consortium on Instructional Shake Tables: Final Report to NSF. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/publications/publications.htm> (24.07.09).

Ricciardelli, F., Pizzimenti, A. D., Mattei, M. 2003. Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness. *Engineering Structures* 25 (2003) 1199–1209.

Rozman, M. 2005. Nelinearna analiza nesimetrične armiranobetonske stavbe pri potresni obtežbi. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 132 str.

Sato, M., Inoue, T. 2004. General frame work of research topics utilizing the 3-D full-scale earthquake testing facility. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 3 (Special ISSUE), 2004.

SERIES, 2009. Seventh Framework Programme, Capacities Specific Programme, Research Infrastructures. Annex I – Description of Work, Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies.

Shake Table II, User Manual. 2008. Specialty Plant: Shake Table II, Position Control and Earthquake Analysis. Markham, ON, Quanser Inc: 102 str.

Shake Table Software, User Guide. 2008. Specialty Plant: Shake Table, Position Control.
Markham, ON, Quanser Inc: 18 str.

Shonkwiler, B. E., Miller T. H. 2001. Small-Scale Shake Table Experiments and Comparison
to Analytical Predictions. <http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Spencer, B. 2003. Shakes and Quakes: K-12 Outreach Activities in Earthquake Engineering.
<http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (07.04.09).

Standing Strong: 2009 NEESWood Capstone Test.
<http://www.nsf.gov/news/newsmedia/neeswood/> (13.08.09)

The University Consortium on Instructional Shake Tables.
<http://mase.wustl.edu/wusceel/ucist/> (25.2.09).

Universal Power Module (UPM), User Guide. Markham, ON, Quanser Inc: 27 str.

Zupan, D., 2005. Programski jezik MATLAB, Kratek tečaj. <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/KiD/KD.htm> (12.08.09).